

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОР-  
СЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.В. Коваль  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності - 122 Комп'ютерні науки

за спеціалізацією - Комп'ютерний моніторинг та геометричне моделювання процесів і систем

на тему:

«Моделювання складних ізотропних поверхонь»

Виконала: студентка 6 курсу, групи ТР-81Мп

Дорощук Дар'я Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник

проф., д.т.н. Аушева Н. М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”**

Факультет теплоенергетичний

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Рівень вищої освіти другий, магістерський

зі спеціальності - 122 Комп'ютерні науки

за спеціалізацією - Комп'ютерний моніторинг та геометричне моделювання процесів і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль О.В.

(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Дорошук Дар'ї Валеріївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Моделювання складних ізотропних поверхонь

Науковий керівник Аушева Наталія Миколаївна, д.т.н., доц.

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “04” листопада 20 19 року № 3813-С

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: інформаційні технології геометричного моделювання просторової кривої Без'є шляхом деформації плоскої кривої

4. Предмет дослідження: інформаційні технології моделювання ізотропних поверхонь

5. Перелік питань, які потрібно розробити \_\_\_\_\_

– проаналізувати сучасні методи моделювання кривих Без'є третього порядку, заданих у векторно-параметричному вигляді;

– проаналізувати сучасні методи побудови плоских кривих на основі ізотропних параметрів;

– проаналізувати методи моделювання плоскої ізометричної сітки та з'ясувати методи моделювання ізометричної поверхні на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку;

– провести аналіз методу моделювання просторової ізотропної кривої Без'є на основі деформації плоскої кривої;

– спроєктувати архітектуру та діаграму класів системи моделювання складних ізотропних поверхонь;

– розробити програмне забезпечення для моделювання складних ізотропних поверхонь.

6. Орієнтований перелік ілюстративного матеріалу Моделювання просторової ізотропної кривої шляхом деформації плоскої кривої, Засоби розробки, Структура та діаграма класів програмного додатку, Інтерфейс користувача
7. Орієнтований перелік публікацій \_\_\_\_\_

1. Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт 2017/2018 навчального року зі спеціалізацій “Прикладна геометрія, інженерна графіка та технічна естетика” (м. Харків, 16-20 квітня 2018 року).

2. XVI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (м. Київ, 26-27 квітня 2018 року).

3. XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (м. Київ, 23-26 квітня 2019 року).

8. Дата видачі завдання “10” вересня 2018 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	10.09.18р.	
2	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв’язання поставленої задачі	01.10.18р. — 31.01.19р.	
3	Підготовка матеріалів магістерської роботи	01.10.18р. — 20.11.19р.	
4	Підготовка публікацій	01.03.18р. — 26.04.19р.	
5	Захист програмного продукту	24.10.19р	
6	Передзахист	20.11.19р	
7	Захист	.12.19р	

Студент

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Дорошук Д.В.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Аушева Н.М.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, переліку посилань з 25 найменувань, 1 додатку, і містить 38 рисунків, 22 таблиці. Повний обсяг магістерської дисертації складає 100 сторінок, з яких перелік посилань займає 3 сторінок, додатки – 8 сторінок.

**Актуальність теми.** Актуальність роботи зумовлена скороченням кількості впроваджень нових способів конструювання складних ізотропних поверхонь при проектуванні споруд, мереж і виробів, що у повній мірі відповідають меті автоматизованого проектування і відтворення. Удосконалення існуючих та розвиток нових методів моделювання таких поверхонь у процесі конструювання мають важливу цінність для підвищення продуктивності та ефективності застосування праці на етапі проектування й ініціювання наукових досліджень.

Також на сьогоднішній день ринку не відомі програмні системи для моделювання складних ізотропних поверхонь шляхом визначення уявних і реальних параметрів при взаємодії з графічним полотном. Адже відомі ринку альтернативні рішення не передбачають можливість впливу на значення реальних параметрів просторової кривої шляхом зміни значень уявних її параметрів. Дана властивість має місце бути завдяки застосуванню комплексних чисел.

**Метою дослідження** є створення системи моделювання складних ізотропних поверхонь.

Для досягнення поставленої задачі були сформульовані наступні **завдання дослідження**, що визначили логіку дослідження та його структуру:

- проаналізувати сучасні методи моделювання кривих Без'є третього порядку, заданих у векторно-параметричному вигляді;
- проаналізувати сучасні методи побудови плоских кривих на основі ізотропних параметрів;
- проаналізувати методи моделювання плоскої ізометричної сітки та з'ясувати методи моделювання ізометричної поверхні на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку;

- провести аналіз методу моделювання просторової ізотропної кривої Без'є на основі деформації плоскої кривої;
- спроектувати архітектуру та діаграму класів системи моделювання складних ізотропних поверхонь;
- розробити програмне забезпечення для моделювання складних ізотропних поверхонь.

**Об'єктом дослідження** є інформаційні технології геометричного моделювання просторової кривої Без'є шляхом деформації плоскої кривої.

**Предметом дослідження** є інформаційні технології моделювання ізотропних поверхонь.

**Методи дослідження.** Розв'язання поставлених задач виконувались з використанням наступних методів:

- метод моделювання кривої Без'є третього порядку, заданої у векторно-параметричному вигляді;
- метод побудови плоских кривих на основі ізотропних параметрів;
- метод моделювання плоскої ізометричної сітки на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку;
- метод моделювання ізометричної поверхні на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку;
- метод моделювання просторової ізотропної кривої Без'є на основі деформації плоскої кривої.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає в розробці системи моделювання складних ізотропних поверхонь, що спрощує роботу викладачам, студентам та науковцям, а також може широко застосовуватися у архітектурі, наприклад, при формуванні зонтичних поверхонь.

**Ключові слова.** *МОДЕЛЮВАННЯ, КРИВА У ВЕКТОРНО-ПАРАМЕТРИЧНОМУ ВИГЛЯДІ, КРИВА БЕЗ'Є ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ, ІЗОТРОПНА КРИВА, КРИВОЛІНІЙНИЙ КОНТУР, ПЛОСКА СІТКА, ПРОСОЛОВА КРИВА, СКЛАДНА ІЗОТРОПНА ПОВЕРХНЯ.*

## ABSTRACT

Master's thesis consists of an introduction, five sections, a conclusion, a list of references from 25 denominations, 1 appendice, and have 38 figures, 22 tables. The full volume of the master's thesis is 100 pages, 3 of which is list of references, 8 – appendices.

**Topicality.** The relevance of the work is caused by the reduction of the number of implementations of new ways of designing complex isotropic surfaces in the design of structures, networks and products that fully meet the purpose of automated design and reproduction. Improvement of existing and development of new methods of modeling of such surfaces in the design process have a great value for increasing the productivity and efficiency of the application of work at the design and initiation stage of scientific research.

Also there are no software systems for modeling complex isotropic surfaces by defining imaginary and real parameters when interacting with a graphic canvas. After all, the known alternative solutions of the market do not provide the opportunity to influence the value of the real parameters of the spatial curve by changing the values of its imaginary parameters. This property must be due to the use of complex numbers.

**The aim of the research is** creation of the system for modeling complex isotropic surfaces.

To accomplish the task, the following **research objectives** were formulated, which defined the logic of the study and its structure:

- to analyze modern methods of modeling third-order Bezier curves, given in vector-parametric form;
- to analyze modern methods of construction of flat curves based on isotropic parameters;
- to analyze the modeling methods of a flat isometric grid and to find out methods of modeling an isometric surface on the basis of a third order Bezier isotropic curve;
- to analyze the method of modeling the Bezier spatial isotropic curve based on the deformation of the plane curve;
- to design the architecture and diagram of classes of modeling system of complex isotropic surfaces;
- to develop software for modeling complex isotropic surfaces.

**The object of research** is the information technology of geometric modeling of the Bezier spatial curve by deformation of the plane curve.

**The subject of research** is the information technology of isotropic surface modeling.

**Research Methods.** The solving of defined tasks was performed using the following methods:

- the third-order Bezier curve method, given in vector-parametric form and the method of constructing flat curves based on isotropic parameters;
- the method of modeling a flat isometric grid based on a third-order Bezier isotropic curve;
- the method of modeling a isometric surface modeling method based on a third-order Bezier isotropic curve;
- the method for modeling a Bezier spatial isotropic curve based on a plane curve deformation.

**The practical value of research** to develop a system of modeling complex isotropic surfaces, which simplifies the work of teachers, students and scientists, and can also be widely used in architecture, for example, in the formation of umbrella surfaces.

**Keywords.** *MODELING, FUNDAMENTAL SPLINE, PH-CURVE, PYTHAGOREAN-HODOGRAPH CURVE, CATMULL-ROM SPLINE, RATIONAL CURVE, BEZIER PATCH, BEZIER SURFACE.*

# ЗМІСТ

Вступ.....	11
1 Сучасні дослідження методів і систем моделювання плоских та просторових ізотропних кривих .....	14
1.1 Порівняльний аналіз існуючих програмних систем .....	14
1.1.1 Опис системи AutoCAD .....	15
1.1.2 Опис системи 3Ds Max.....	16
1.1.3 Опис системи Maple .....	17
1.2 Методи для моделювання кривих ліній, заданих у векторно-параметричному вигляді .....	18
1.2.1 Базові поняття формоутворення кривих .....	18
1.2.2 Огляд геометричних об'єктів .....	20
1.2.3 Систематика кривих .....	21
1.2.4 Криві третього порядку.....	21
1.3 Методи моделювання кривої Без'є третього порядку, заданої у векторно-параметричному вигляді .....	22
1.3.1 Крива Без'є .....	22
1.3.2 Властивості кривої Без'є .....	23
1.4 Висновки до розділу 1 .....	26
2 Теоретичне підґрунття методів моделювання кривих і поверхонь на основі ізотропних характеристик .....	27
2.1 Побудова плоских кривих на основі ізотропних параметрів.....	27
2.1.1 Побудова плоских ізотропних відрізків .....	27
2.1.2 Формування кривих Без'є на основі ізотропних елементів .....	29
2.1.3 Довжина характеристичного многокутника кривої Без'є .....	29
2.1.4 Побудова ізотропної плоскої кривої Без'є n-го порядку .....	30
2.2 Моделювання плоскої ізометричної сітки на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку .....	32



2.3	Моделювання ізометричної поверхні на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку .....	34
2.4	Моделювання просторової ізотропної кривої Без'є на основі деформації плоскої кривої.....	36
2.5	Висновки до розділу 2.....	38
3	Опис програмної реалізації графічного редактору для моделювання складних ізотропних поверхонь .....	40
3.1	Засоби розробки програмної системи .....	40
3.2	Опис системи контролю версій.....	43
3.3	Діаграма класів .....	43
3.4	Діаграма послідовностей модулю аутентифікації користувача .....	44
3.5	Схема таблиць бази даних .....	46
3.6	Опис програмного модулю побудови ізотропної кривої Без'є третього порядку.....	47
3.7	Опис програмного модулю побудови плоскої ізометричної сітки .....	47
3.8	Опис програмного модулю побудови мінімальної поверхні на основі просторової кривої.....	48
3.9	Опис програмного модулю для збереження історії моделювання для конкретного облікового запису користувача.....	48
3.10	Висновки до розділу 3.....	49
4	Опис випробування розробленого програмного забезпечення .....	50
4.1	Системні вимоги .....	50
4.2	Робота користувача з програмною системою.....	50
4.3	Висновки до розділу 4.....	60
5	Розроблення стартап-проекту .....	61
5.1	Опис ідеї стартап-проекту .....	61
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту .....	71
5.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	72
5.4	Розроблення ринкової стратегії проекту.....	81
5.5	Розроблення маркетингової компанії стартап-проекту.....	83

5.6 Висновки до розділу 5 .....	86
Висновки .....	88
Список використаних джерел .....	90
Додаток 1.....	93

## ВСТУП

Актуальність роботи зумовлена скороченням кількості впроваджень нових способів конструювання складних ізотропних поверхонь при проектуванні споруд, мереж і виробів, що у повній мірі відповідають меті автоматизованого проектування і відтворення [25]. Удосконалення існуючих та розвиток нових методів моделювання таких поверхонь у процесі конструювання мають важливу цінність для підвищення продуктивності та ефективності застосування праці на етапі проектування й ініціювання наукових досліджень [8, 9, 10].

Важливо пам'ятати, що моделювання просторової ізотропної кривої відбувається за допомогою побудови плоскої дійсної параметричної кривої. Відтак, оскільки, певного поширення, особливо в комп'ютерній графіці, для зручного моделювання кривих набули криві Без'є, які задаються координатами початкової, кінцевої та сукупністю проміжних між ними точок. Даний метод має певне аналітичне підґрунтя, у зв'язку з чим, зникає необхідність запам'ятовувати кожен точку кривої, що моделюється. Це дозволяє створювати складні криволінійні обводи з невеликою кількістю управляючих вершин. Проте доцільний вибір координат цих управляючих вершин є складною операцією для отримання задовільного результату моделювання того чи іншого об'єкта або процесу [13].

Також, для конструювання просторових ізотропних кривих необхідно визначити ізотропні характеристики. Включення ізотропності характеристичного многокутника та хорд призводить до перетворення просторової кривої у плоску.

Основним завданням роботи є формування дискретних моделей геометричних образів зокрема геометричної моделі просторового покриття на стадії ескізного проектування, керування формою змодельованої поверхні [13].

Теорія мінімальних кривих (ізотропних) була заснована Софусом Лі. Вейерштрассе запропонував безквадратурне подання ізотропних кривих, а Моделюванням і дослідженням ізотропних кривих у комплексному просторі займався Картан.

В ході планування майбутнього програмного додатку було вирішено створити

розподілену програмну систему [22], яка б дозволяла користувачеві створити власний обліковий запис, а відтак, мати можливість моделювати лінії, криві та поверхні, які будуть збережені для облікового запису конкретного користувача і недоступні іншим користувачам даної системи. Програмна система має надати змогу користувачеві за наявності обраних координат трьох опорних вершин моделювати просторову ізотропну криву на основі ізотропних її координат, після чого програмний продукт розрахував би координати останньої вершини заданої кривої, створив алгоритмічну базу вихідних точок дискретної сітки для ізометричної поверхні, опираючись на реальні та уявні координати цієї кривої і міг продемонструвати усі результати користувачеві.

У роботі описується повний цикл розробки програмного забезпечення [22] для конструювання складних ізотропних поверхонь, починаючи від аргументації обраних програмно-технічних засобів та завершуючи описом використання системи майбутнім користувачем.

Зміст розділів пояснювальної записки наступний:

У першому розділі проведено огляд існуючих теоретичних та практичних рішень моделювання кривих Без'є третього порядку на основі ізотропних характеристик, критерії вибору методу для використання в роботі, порівняльний аналіз розглянутих рішень за відповідними критеріями.

Другий розділ надає опис методів розв'язання поставленої задачі моделювання складних ізотропних поверхонь, теоретичну основу для послідовного вирішення завдання програмним чином.

Третій розділ містить опис програмної реалізації системи та є документальним супроводом розробленого програмного забезпечення. До нього входить інформація про складові програмні модулі та їх взаємодію (структура та архітектура програмної системи).

У четвертому розділі пояснюється методика роботи користувачів з програмною системою, опис доступу до неї та приклади сценаріїв розв'язання задач користувача у вигляді екранних форм та стислих коментарів.

П'ятий розділ є супроводжувальним документом стартап-проекту розроблюваної програмної системи.

Майбутніми користувачами системи можуть бути викладачі, студенти та науковці, при цьому, у випадку, коли системний продукт буде розширено та оптимізовано, він стане у пригоді спеціалістам більш вузьких профілів.

# 1 СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКИХ ТА ПРОСТОРОВИХ ІЗОТРОПНИХ КРИВИХ

Розділ складається з аналізу і опису наявних сьогодні програмних систем для моделювання кривих і поверхонь, заданих у векторно-параметричному вигляді, а також огляду методів, обраних для реалізації такого моделювання з поясненням всіх теоретичних понять та виразів.

## 1.1 Порівняльний аналіз існуючих програмних систем

Порівнюючи існуючі системи моделювання просторової кривої на основі ізотропних характеристик, можна помітити, що кожна з них унікальна та має свої сильні і слабкі сторони. Це пов'язано зі значною специфікою галузі для якої вони розробляються. Для порівняння було обрано три системи — AutoCAD, 3Ds Max та Maple.

Розглядатимемо обрані програмні комплекси з точки зору вирішення поставлених завдань. Результати порівняння систем аналізу моделювання складних ізотропних поверхонь наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1— Порівняльна характеристика існуючих продуктів

Функціональність	AutoCAD	Maple	3Ds Max	Розроблена система
Моделювання ізотропної кривої Без'є третього порядку (на основі комплексних чисел)	-	+	-	+
Моделювання складної ізотропної поверхні за допомогою графічного полотна	-	-	-	+
Можливість модифікувати складну ізотропну поверхню шляхом зміни її уявних параметрів за допомогою графічного полотна	-	-	-	+

Таблиця 1.1(продовження)

Можливість графічної взаємодії зі складними ізотропними поверхнями	-	-	-	+
Моделювання складного криволінійного контуру	+	+	+	+
Можливість збереження історії моделювання у файл/БД	+	-	+	+

### 1.1.1 Опис системи AutoCAD

Програма AutoCAD — багатофункціональний програмний продукт, який реалізує 2D- і 3D-технології подання проектів і винаходів практично будь-якої сфери діяльності (рисунок 1.1).

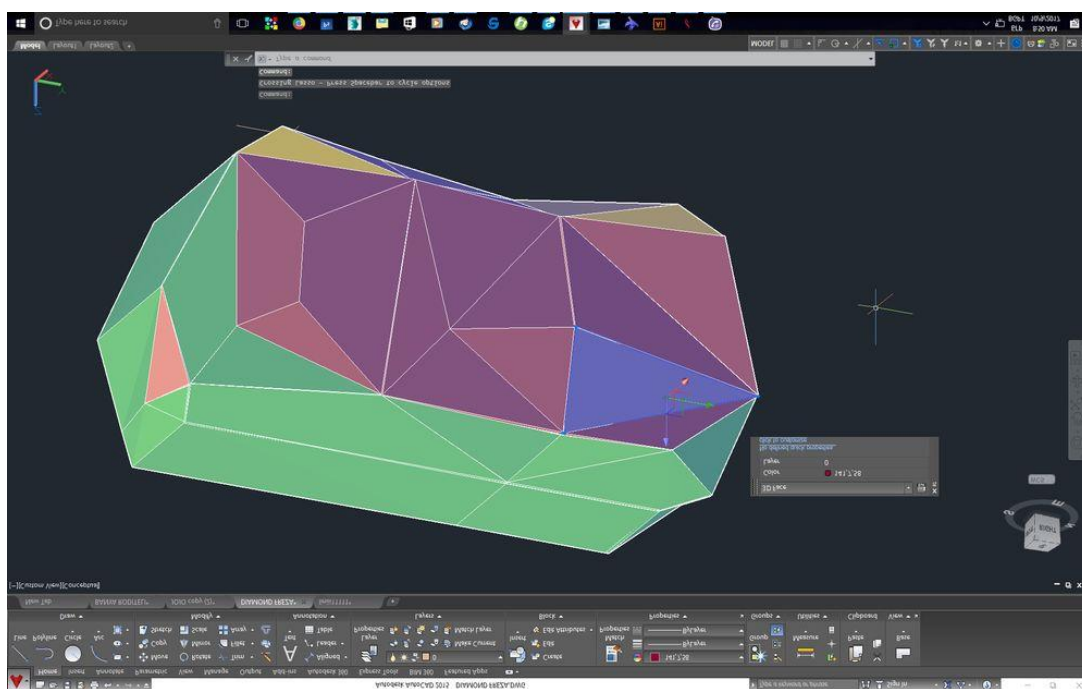


Рисунок 1.1 — Приклад конструювання поверхні в середовищі “AutoCAD”

Розробник програмної системи AutoCAD — компанія Autodesk, яка є найбільшим у світі розробником і постачальником САПР цивільного і промислового будівництва, машинобудування та інших сфер діяльності.

Випуск першої версії продукту відбувся у 1982 році. За тридцять років існування продукту було випущено понад тисячі додатків і спеціалізованих рішень [14].

Система AutoCAD включає модуль параметричного креслення і модуль керування даними. При цьому модуль параметричного креслення, в свою чергу, поділяється на інтерактивний модуль параметрів, який дозволяє користувачеві вводити ключові параметри, необхідні для розробки, і модуль креслення, який вирізняється застосуванням VBA технології програмування для отримання змінної назви поля в базі даних Access для передачі параметру інформації користувача VBA намалювати форму, щоб реалізувати функцію автоматичного креслення [14].

### 1.1.2 Опис системи 3Ds Max

Програмна система 3Ds Max — система, яка дозволяє виконувати 3-D моделювання, створювати анімацію та рендириг, широко використовується для розробки ігор і візуалізації дизайну. Приклад виконання моделювання у системі представлено на рисунку 1.2.

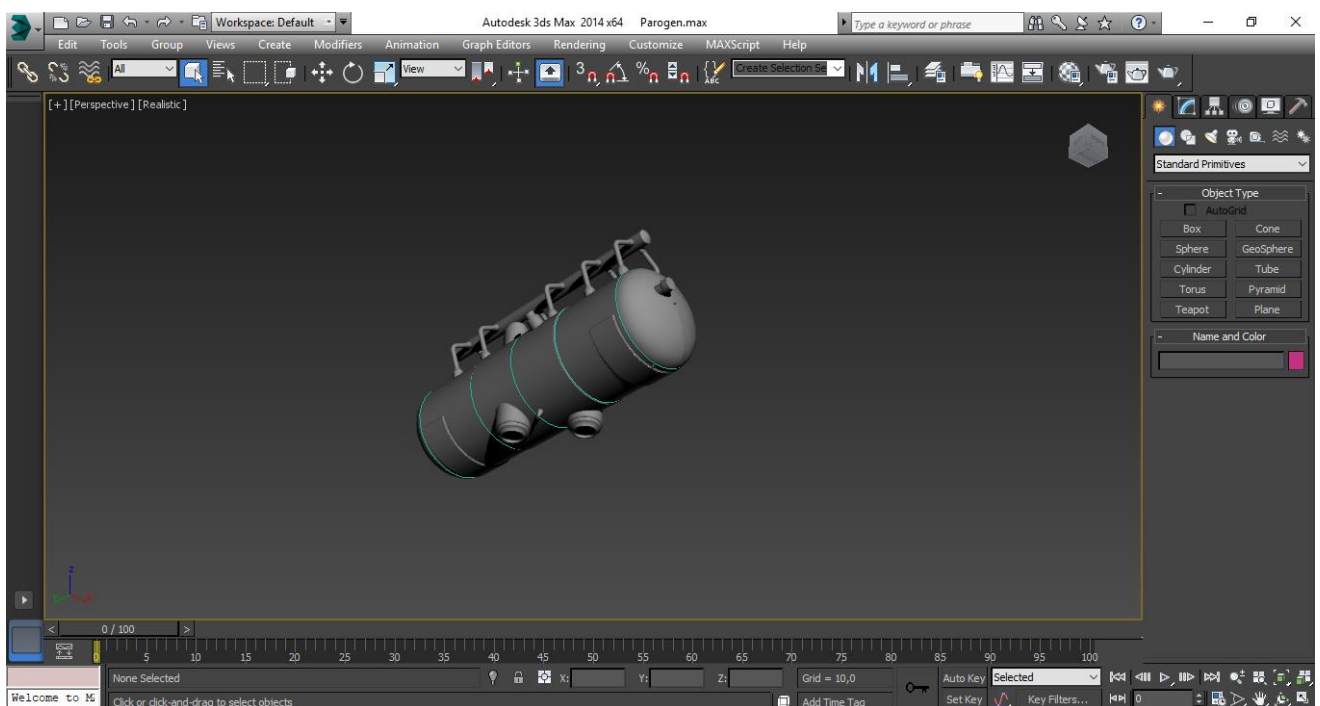


Рисунок 1.2 — Моделювання в системі 3Ds Max

Система є складовою архітектури, інженерної і будівельної колекцій Autodesk.



Програмна система 3Ds Max застосовується для формування візуальних ефектів митцями та професіоналами у галузі кіно та телебачення, розробниками ігор для створення розважальних додатків віртуальної реальності. Програмне забезпечення є дуже корисним для проектування, створення інфраструктури та будівництва, а також для розробки та планування виробництва.

### 1.1.3 Опис системи Maple

Програмна система Maple — математичне програмне забезпечення, яке поєднує в собі потужний математичний двигун з інтерфейсом, що робить його надзвичайно простим для аналізу, вивчення, візуалізації та вирішення математичних проблем. Початкове вікно системи представлено на рисунку 1.3.

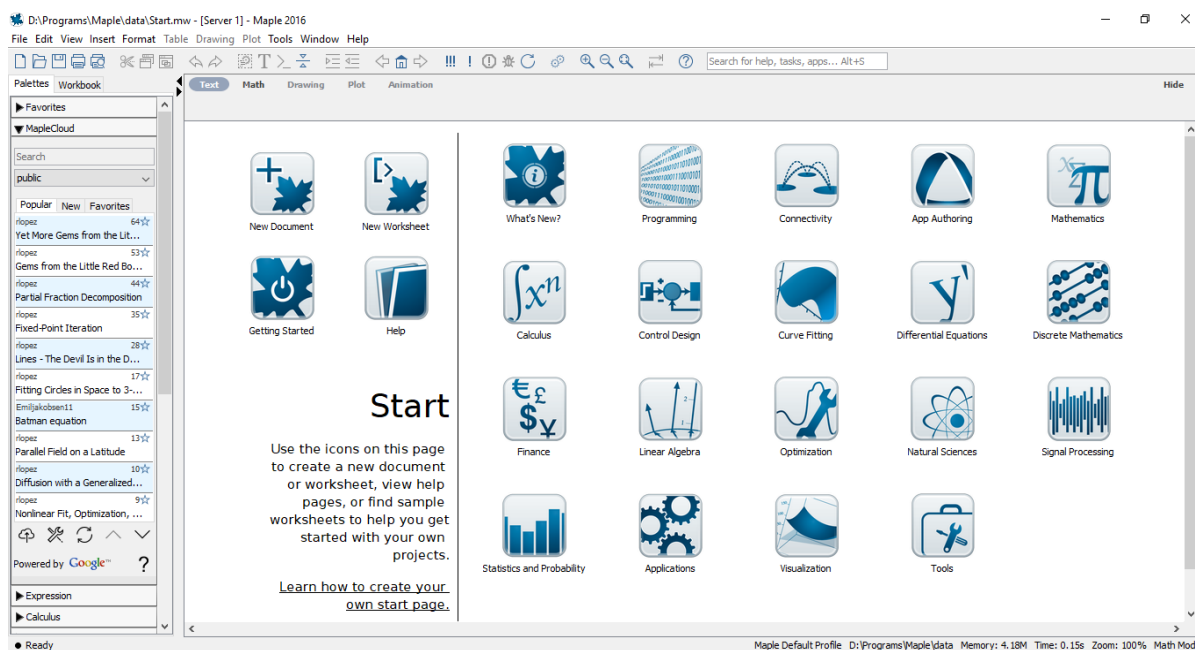


Рисунок 1.3 — Початкове вікно системи Maple

Програмне забезпечення, яке створено компанією Waterloo Maple Incorporation у 1984 році та призначено для символічних обчислень, хоча система володіє множиною застосувань для чисельного розв’язання диференціальних рівнянь і знаходження інтегралів. Особливістю системи є власна мова програмування, що нагадує Pascal [16]. Система вирізняється з-поміж інших завдяки додатку MapleNet, який надає стандартний інтерфейс додатків для інтерфейсу веб-служб, що робить обчислювальну

потужність Maple доступною незалежно від мови або інфраструктури, яку використовує користувач для створення власного веб-сайту, настільних програм та мобільних програм [16].

## **1.2 Методи для моделювання кривих ліній, заданих у векторно-параметричному вигляді**

У цьому підрозділі подано базові положення та принципи комп'ютерного моделювання плоских кривих, огляд кривих третього порядку.

### **1.2.1 Базові поняття формоутворення кривих**

Криві лінії займають важливе місце у різних галузях техніки і будівництва. Їх використовують при розв'язанні різноманітних наукових та інженерних задач, у геометричному моделюванні різних технічних об'єктів. Обриси більшості будівель, запчастин машин і механізмів подаються лініями. За допомогою кривих ліній зображають обводи човнів, літаків, автомобілів, лопаток турбін і компресорів тощо. Це слугує можливістю власноруч прослідкувати траєкторію, за якою рухаються об'єкти, дію будь-якого процесу, відслідкувати результати досліджень впроваджених експериментів чи розрахунків на базі теоретичних відомостей. Відтак, криві лінії допомагають ліпше зрозуміти геометрію деякої залежності, прослідкувати виявлені закономірності, які ще не підтвердженні за допомогою аналітичних суджень, вирішити наукову або інженерну задачу [11]. При цьому, криві можуть бути подані графічно або рівнянням у системі координат. Тож, одні з існуючих способів утворення кривих [20]:

1. Крива лінія представлена у вигляді перетину певної поверхні конкретною площиною (для прикладу обрано криві 2го порядку, адже визначаються як перетин кругового конусу, криві Персея – як перетин площинної поверхні Торна).

2. Крива лінія представлена в якості геометричного місця деяких точок, які поєднані певною властивістю (для прикладу обрано цисоїду Діоклеса, конхоїду Нікомеда, равлик Паскаля, овали Кассіні, овали Декарта тощо).

3. Крива лінія задана траєкторією руху деякої точки, внаслідок заданого способу (для прикладу обрано спіраль Архімеда — сформована траєкторія руху точки, що перебуває у різних рівномірних рухах — пряма та коло. Інші представники: циклоїдальні криві, квадратріса Дінострата, лемніската Бернуллі).

4. Крива лінія подана у вигляді утворення ліній внаслідок з'єднання відповідних відносно проекції складових (наприклад, спіраль Архімеда, циклоїда, овали Декарта).

5. Крива лінія визначена заданням властивостей, визначених після диференціювання (наприклад, трактриса, показникова крива лінія, ланцюгова лінія).

6. Крива лінія представлена як результат деякої зміни в геометричному плані раніше визначеної кривої.

7. Крива лінія задана за допомогою аналітичної форми (наприклад, парабола, гіпербола тощо) [5].

Попри той факт, що спеціалісти в галузі геометрії та наук з прикладним напрямком винайшли досить різноманітні методи формування кривих, залишається достатня кількість завдань, які формують зацікавленість фахівців для наступних нововведень у формуванні сучасних способів утворення кривих. По-перше, це стосується продуктів комплексних програмно галузей промисловості. Появі нових способів формоутворення кривих ліній особливо сприяє зростання функцій комп'ютерів для демонстрації графічних значень на екрані комп'ютера [11]. Таким чином, моделювання розглядається як штучне спричинення деяких подій, таких як політ літака або космічного апарату, рух машини і т.п. Сьогодні в телевізійних програмах, кіно науково-популярного жанру існують рухомі об'єкти, котрі, ззовні майже не поступаються об'єктам, закарбованим кінокамерою. Проте, комп'ютерна графіка сформувала різноманітні спецефекти, що в попередні часи можна було складно навіть уявити. В останні роки досить відома така область використання комп'ютерної графіки як формування віртуальної реальності. За допомогою комп'ютерних інновацій автоматизованого проектування інженерно-конструкторська діяльність містить розвинену область використання комп'ютерного геометричного моделювання. Векторна графіка вирізня-

ється завдяки зображенням, які сприймаються як сукупність певних об'єктів, досліджених з математичної точки зору. Правила векторної графіки націлені на моделювання лінійних контурів, що складаються з простих кривих, описаних математичними рівняннями. Елементарним об'єктом даного виду графіки є лінія і базується вона на математичному уявленні лінії [13].

### 1.2.2 Огляд геометричних об'єктів

Геометричні об'єкти, які складають геометричну модель і слугують для її візуалізації називають ідеалізованими геометричними об'єктами (точка, лінія, площа і т.п.), які містять тільки істотні властивості (наприклад, геометрична точка має лише координати, але не має розмірів) [5].

Методи нарисної геометрії ввели в науку дослідження предметів на їх геометричних моделях, які означають однозначне наочне представлення матеріальних об'єктів на площині та слугують в якості дослідження їх геометричних властивостей. Введення прямокутної системи координат Декартом є початком появи нового методу зображення геометричних об'єктів — аналітичної геометрії, яка має на меті можливість отримувати і досліджувати властивості багатовимірних геометричних об'єктів завдяки алгебраїчним рівнянням [14].

Отже, крива лінія — це неперервна множина розташованих одна за одною точок, які переміщуються у просторі. В інженерній графіці криві характеризують за їх проекціями. У випадку, коли всі точки кривої лінії лежать на одній площині, що називається площиною кривини кривої, тоді крива називається плоскою, наприклад, коло, еліпс, парабола, гіпербола, лінії перетину кривих поверхонь тощо. У випадку, коли точки кривої не лежать на одній площині, крива називається просторовою, наприклад, гвинтові лінії, лінії сполучення кривих поверхонь [6].

Порядок кривої лінії характеризується степенем її рівняння. Згідно геометрії, порядок кривої характеризується кількістю точок (дійсних та уявних) внаслідок сполучення її з прямою лінією. Порядок кривої у просторі характеризується кількістю точок її сполучення з площиною [6].

Криві лінії класифікують за:

- гладкістю;
- наявністю точки перегину;
- наявністю точки зламу;
- наявністю подвійних точок.

### 1.2.3 Систематика кривих

Класифікація кривих базується на формуванні їх рівнянь у декартовій системі координат, а тому, криві класифікують як алгебраїчні криві та трансцендентні криві.

Така крива в деякій системі координат має можливість задаватися за допомогою алгебраїчного рівняння, а в іншій — трансцендентного рівняння. Крім того, бувають випадки, коли характер рівняння змінюється згідно розташування системи координат.

Алгебраїчна крива  $n$ -го порядку визначена в декартовій системі координат в результаті скорочення від дробової частини має наступне рівняння

$$A_0x^n + A_1x^{n-1}y + A_2x^{n-2}y^2 + \dots + A_ny^n + B_0x^{n-1} + B_1x^{n-2}y + \dots + L_0x + L_1y + M = 0$$

Алгебраїчні криві класифікують за порядком кривої, який визначається степенем її рівняння [5]. При цьому вираз  $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$  відображає кількість членів такого рівняння [3].

### 1.2.4 Криві третього порядку

Криві третього порядку характеризуються наявністю точки перегину.

Такі криві є достатньо спорідненими лініям, що оточують нас у навколишньому середовищі, як приклад, обриси тулуба живих істот, через що їх застосовують як базові елементи векторної графіки. Криві лінії другого порядку (наприклад, коло чи еліпс) є прикладами кривих третього порядку [3].

Загальне рівняння кривої третього порядку має наступний вигляд:

$$Ax^3 + 3Bx^2y + 3Cxy^2 + Dy^3 + 3Ex^2 + 6Fxy + 3Gy^2 + 3Hx + 3Ky + L = 0$$

Для визначення такої кривої необхідно лише дев'ять параметрів, а графічне по-

дання кривої третього порядку зображається за визначеними коефіцієнтами її рівняння. З метою більш легкого сприйняття, у редакторах векторної графіки використовують спеціальний тип, під назвою криві Без'є [13].

Можливості формування апроксимуючого багаточлена цікаві багатьом математикам. Через це вчений Бернштейн у XX столітті визначив доказ теореми Вейерштрасса залучивши теорію ймовірності. Таким чином бажаний поліном задається у непараметричному вигляді. Такий поліном є базовим при моделюванні сплайнових кривих, таких як NURBS-криві і криві Без'є [13].

### **1.3 Методи моделювання кривої Без'є третього порядку, заданої у векторно-параметричному вигляді**

У підрозділі подано базові положення та принципи комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення кривої Без'є третього порядку, моделювання складених кривих і кривих на основі ізотропних характеристик.

#### **1.3.1 Крива Без'є**

Особливим випадком кривих третього порядку є їх відрізки, адже визначаються за допомогою менше ніж одинадцяти параметрів, подібно довільним відрізкам кривих третього порядку, а саме — вісім, що робить їх більш зручними у використанні.

Векторна графіка задіяла криві Без'є з метою формування гладких кривих, що можуть застосовувати масштабування нескінченну кількість разів. “Шляхи”, що їх так зазначають у додатках редагування зображень, є поєднанням складених кривих Без'є. Шляхи не обов'язково менші ніж розміри об'єктів растрової графіки, а їх зміна є досить елементарною [3].

Криві Без'є застосовуються для формування анімаційних об'єктів в якості інструменту керування рухом та в інформаційних технологіях для автоматизації проектування [3].

Параметричне рівняння кривої Без'є у загальному вигляді

$$B(t) = \sum_{i=0}^n b_{i,n}(t) P_i, \quad t \in [0,1],$$

де  $P_i$  — опорні вершини,

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \text{ — поліноми Берштейна [21].}$$

### 1.3.2 Властивості кривої Без'є

Крива Без'є має наступні властивості:

- відсутні пробіли всередині обох кінців кривої;
- крива знаходиться між визначеними лініями, що поєднують базовими точки;
- у випадку, якщо вказані тільки дві базові точки — сегмент є прямою лінією;
- у випадку, якщо контрольні точки кривої належать одній прямій, крива буде визначена як пряма лінія;
- крива Без'є симетрична, адже модифікація напрямку руху не змінює форму кривої;
- байдужа до афінних перетворень;
- зміна координат будь-якої опорної вершини призводить до модифікації форми всієї кривої Без'є;
- будь-який сегмент кривої Без'є є кривою Без'є;
- степінь кривої є меншим на одиницю від кількості опорних точок;
- коло не можливо задати за допомогою параметричного рівняння кривої Без'є;
- не можна визначити паралельні криві Без'є, не рахуючи тривіальні випадки (прямі лінії та однакові криві), проте є алгоритми, що визначають найбільш близьку паралельну криву Без'є з малою відмінністю [5].

Класифікують три види кривих Без'є, а саме:

- лінійні криві Без'є,
- криві Без'є другого порядку (квадратичні),
- криві Без'є третього порядку (кубічні) [3].

В даній роботі розглянуто останній тип кривої, оскільки цей тип є найбільш

гнучким для маніпулювання й адаптованим для формації.

Загальне рівняння кривої Без'є третього порядку має наступний вигляд:

$$p = p_0(1-u)^3 + 3p_1(1-u)^2u + 3p_2(1-u)u^2 + p_3u^3, \quad (1.1)$$

$$u \in [0,1],$$

де  $p_0, p_1, p_2, p_3$  — координати опорних вершин.

Спосіб формування кривих Без'є опирається на використання двох дотичних, сполучених з лінією в межах її закінчення (рисунок 1.4).

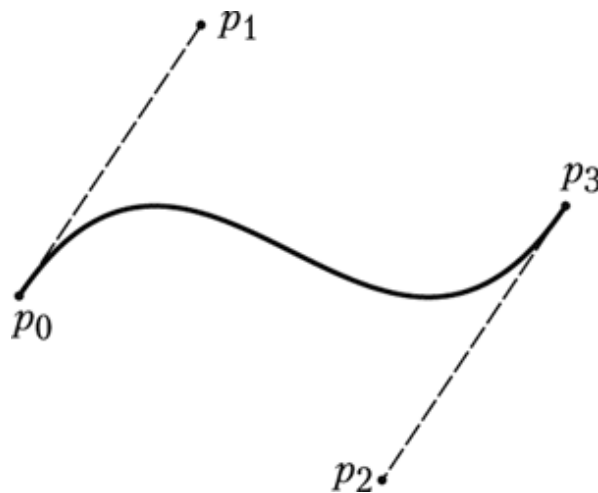


Рисунок 1.4 — Крива Без'є третього порядку

Для моделювання кривої Без'є третього порядку необхідно визначити координати чотирьох опорних вершин. При цьому, крива (рисунок 1.4) перетинає тільки дві її опорні вершини (початкову —  $p_0$ , кінцеву —  $p_3$ ), адже дві інші ( $p_1, p_2$ ) є контрольними точками кривої. З метою більш легкого сприйняття, в системах векторної графіки контрольні точки з'єднані лініями між собою і з базовими точками кривої (рисунок 1.5), утворюючи таким чином характеристичний чотирикутник (у загальному вигляді — рисунок 1.6) [3].

Кожному сегменту можливо визначити нові опорні точки, які теж впливають на форму кривої. Визначення інших контрольних точок для певного сегмента кривої не заперечує факт, що деякі криві поєднуються в контур. Адже крива Без'є приєднується не в кінець контуру, а знаходиться між кінцями створеного контуру [3].



Будь-який контур у векторній формі задається за допомогою векторних сегментів, які є ідентичними окремій простій кривій Без'є [13].

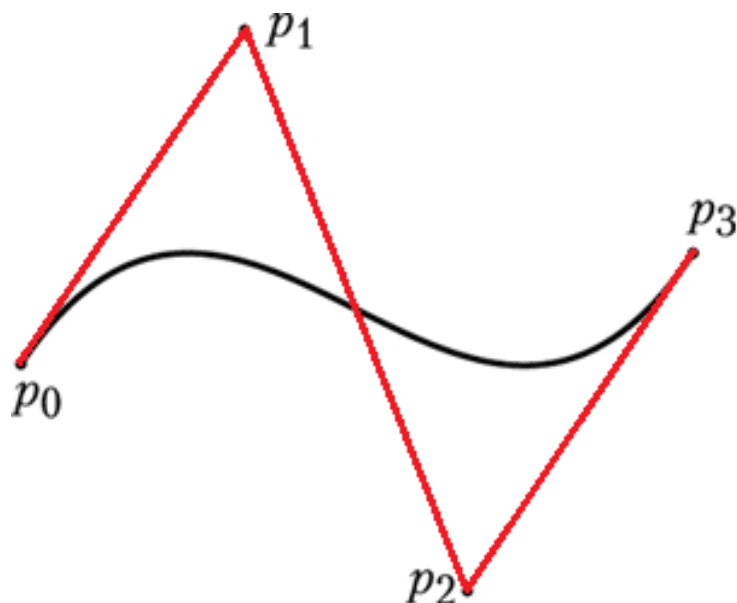


Рисунок 1.5 — Крива Без'є третього порядку і допоміжний характеристичний чотирикутник.

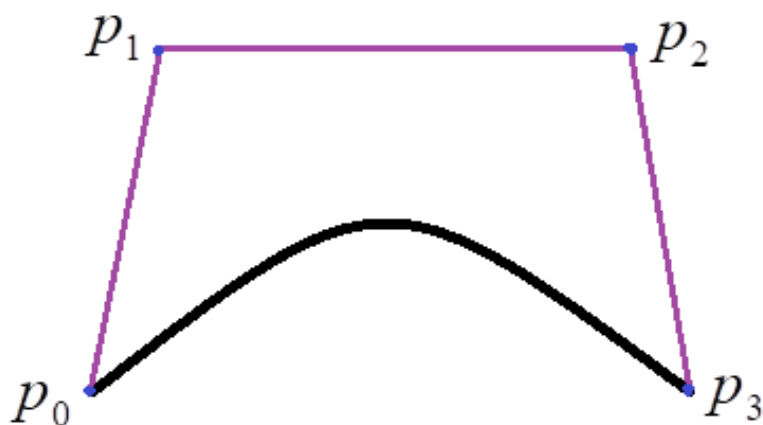


Рисунок 1.6 — Крива Без'є третього порядку і допоміжний характеристичний чотирикутник у загальному вигляді

Отож, в результаті зміни положення базових точок можна визначити багато форм кривих Без'є, що є тільки одним деяким сегментом більш комплексного векторного контуру.

## 1.4 Висновки до розділу 1

Було проведено аналіз існуючих на ринку систем моделювання AutoCAD, 3Ds Max та Maple. В ході аналізу було описано головні ідеї їх створення і впровадження, а також порівняно між собою у таблиці 1.1.

Внаслідок виконаного порівняння було встановлено, що на сьогоднішній день ринку невідомі програмні системи для моделювання складних ізотропних поверхонь шляхом визначення уявних і реальних параметрів при взаємодії з графічним полотном. Адже зазначені вище альтернативні рішення не передбачають можливість впливу на значення реальних параметрів просторової кривої шляхом зміни значень уявних її параметрів. Дана властивість має місце бути завдяки застосуванню комплексних чисел [19].

Як наслідок, було встановлено мету даного дослідження, а саме – створення системи моделювання складних ізотропних поверхонь. Отож, наступним кроком було розглянути методи, які широко використовуються для реалізації моделювання ізотропних кривих ліній і поверхонь у загальному вигляді, а також на конкретному прикладі кривих Без'є третього порядку, що дозволило визначити об'єкт даного дослідження – інформаційні технології геометричного моделювання просторової кривої Без'є шляхом деформації плоскої кривої.

## **2 ТЕОРЕТИЧНЕ ПІДРУНТТЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ КРИВИХ І ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ ІЗОТРОПНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Даний розділ містить теоретичну базу, необхідну для створення програмного забезпечення з моделювання ізоотропних кривих Без'є третього порядку, криволінійних контурів, складних ізоотропних поверхонь.

### **2.1 Побудова плоских кривих на основі ізоотропних параметрів**

Побудова плоских кривих на основі векторно-параметричного подання є дуже поширеним способом у комп'ютерній графіці та прикладній геометрії [3, 4]. Відмінність запропонованого полягає у поєднанні диференціальних характеристик кривої, які у комплексному просторі дорівнюють нулю, з моделюванням кривої на основі параметричного рівняння. Основна проблема пов'язана з побудовою кривої з нульовою довжиною [11]. Знаходження таких кривих зводиться до інтегрування та знаходження кореня від диференціального рівняння, ця методика при роботі з поліноміальними кривими призводить до застосування апроксимаційних теорій та не дає в багатьох випадках знайти аналітичний розв'язок. Для подолання цієї перешкоди запропоновано моделювати такі криві на основі ізоотропних характеристичних багатокутників, іноді застосовуючи ізоотропні хорди. При моделюванні кривих пропонується проаналізувати вплив ізоотропної кривини на форму кривої [5].

#### **2.1.1 Побудова плоских ізоотропних відрізків**

В якості базових елементів обираємо ізоотропні відрізки, які згодом будуть формувати основу для ізоотропних характеристичних багатокутників та ізоотропних хорд. Ізоотропний відрізок на площині задається на основі виразу [5]:

$$(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = 0. \quad (2.1)$$

Позбавимось квадратів у рівнянні (2.1) . Одержимо:

$$y_B - y_A = \pm(x_B - x_A).$$

Тобто отримали вираз для підрахунку ординати іншого кінця відрізка, у випадку, коли задані координати точки А та абсциса точки В:

$$y_B = \pm(x_B - x_A) + y_A.$$

Для відображення ізотропного відрізка виділимо його дійсну та уявну частину від значень координат та отримаємо відрізки  $\text{Re}(AB_1)$ ,  $\text{Re}(AB_2)$  та  $\text{Im}(AB_1)$ ,  $\text{Im}(AB_2)$  на дійсній площині [5].

Доцільно визначати дійсну частину ізотропного відрізка АВ та знаходити координати для його уявної частини. В такому випадку маємо змогу визначити координати дійсного відрізка, координати точки А уявного відрізка та підрахувати координати точки В уявного відрізка. Спочатку виділимо дійсні та уявні частини:

$$(y_{B\text{Re}} - y_{A\text{Re}}) + i(y_{B\text{Im}} - y_{A\text{Im}}) = \pm i[(x_{B\text{Re}} - x_{A\text{Re}}) + i(x_{B\text{Im}} - x_{A\text{Im}})]$$

Прирівняємо окремо дійсні частини та уявні:

$$\begin{cases} y_{B\text{Re}} - y_{A\text{Re}} = -(x_{B\text{Im}} - x_{A\text{Im}}) \\ y_{B\text{Im}} - y_{A\text{Im}} = x_{B\text{Re}} - x_{A\text{Re}} \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} y_{B\text{Re}} - y_{A\text{Re}} = x_{B\text{Im}} - x_{A\text{Im}} \\ y_{B\text{Im}} - y_{A\text{Im}} = -(x_{B\text{Re}} - x_{A\text{Re}}) \end{cases}$$

Координати точки В уявного відрізка будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} x_{B\text{Im}} = -(y_{B\text{Re}} - y_{A\text{Re}}) + x_{A\text{Im}} \\ y_{B\text{Im}} = y_{A\text{Im}} + (x_{B\text{Re}} - x_{A\text{Re}}) \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} x_{B\text{Im}} = y_{B\text{Re}} - y_{A\text{Re}} + x_{A\text{Im}} \\ y_{B\text{Im}} = y_{A\text{Im}} - (x_{B\text{Re}} - x_{A\text{Re}}) \end{cases}$$

Таким чином, провівши зазначені розрахунки, отримаємо три відрізки на дійсній площині: один відрізок буде дійсний, а два інших сформовані на основі уявних координат [5].

### 2.1.2 Формування кривих Без'є на основі ізотропних елементів

Нехай крива Без'є  $n$ -го порядку (рисунок 2.1) задана у вигляді:

$$p(t) = \sum_{j=0}^n p_j J_{n,j}(t), \text{ де } J_{n,j}(t) = \frac{n!}{j!(n-j)!} t^j (1-t)^{n-j}, \quad (2.2)$$

де  $p_j = [x_j, y_j]$ ,  $n$  — порядок полінома.

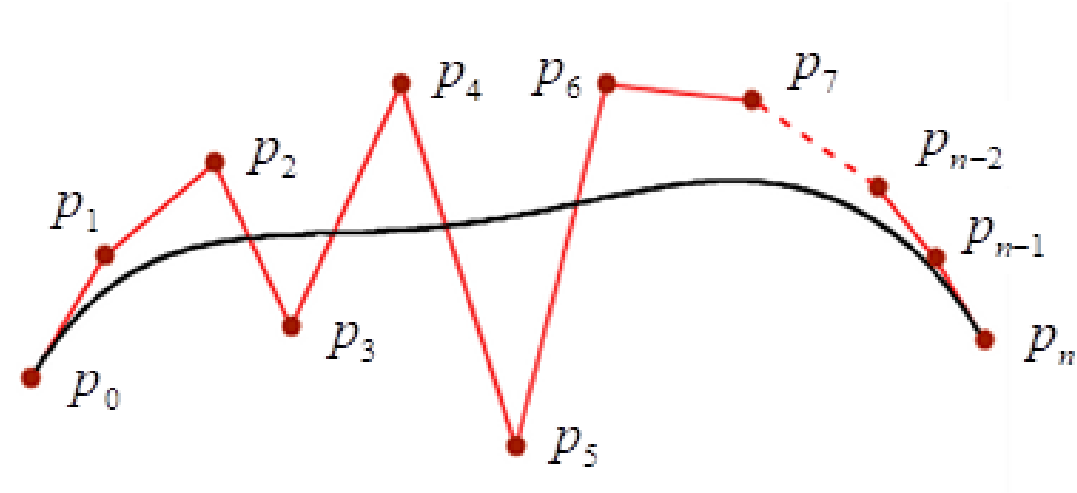


Рисунок 2.1 — Крива Без'є  $n$ -го порядку

Розглянемо криві Без'є як комплексні аналітичні функції дійсного аргументу. При виділенні дійсної та уявної частини окремо, одержимо дві криві [5].

### 2.1.3 Довжина характеристичного багатокутника кривої Без'є

Рівняння для визначення довжини сторони характеристичного багатокутника:

$$P_{j,j+1}^2 = (x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2 \quad (2.3)$$

де  $x_j, y_j$  — комплексні координати точок характеристичного багатокутника,

$j = 0 \dots n, n$  — порядок полінома [5].

Проаналізуємо отримане значення квадрату довжини сторони багатокутника. Виразимо у рівнянні (2.3) дійсну та уявну частини:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(P_{j,j+1}^2) &= (\operatorname{Re}(x_{j+1}) - \operatorname{Re}(x_j))^2 + (\operatorname{Re}(y_{j+1}) - \operatorname{Re}(y_j))^2 - \\ &\quad - (\operatorname{Im}(x_{j+1}) - \operatorname{Im}(x_j))^2 - (\operatorname{Im}(y_{j+1}) - \operatorname{Im}(y_j))^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(P_{j,j+1}^2) = & 2(\operatorname{Re}(x_{j+1}) - \operatorname{Re}(x_j))(\operatorname{Im}(x_{j+1}) - \operatorname{Im}(x_j)) + \\ & + 2(\operatorname{Re}(y_{j+1}) - \operatorname{Re}(y_j))(\operatorname{Im}(y_{j+1}) - \operatorname{Im}(y_j)) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Якщо на вирази (2.4) та (2.5) не накладати додаткові обмеження, при визначенні кореня отримаємо комплексні довжини. Якщо  $\operatorname{Re}(P_{j,j+1}^2 = 0)$ , тоді під коренем маємо уявну величину. При визначенні довжини одержимо комплексне значення, в якому дійсна частина буде дорівнювати уявній:

$$P_{j,j+1} = \sqrt{\operatorname{Im}(R_{j,j+1}^2)} = C \pm Ci$$

Якщо  $\operatorname{Im}(P_{j,j+1}^2) = 0$ , то будемо мати дійсні довжини сторін характеристичного многокутника, а у випадку, коли  $\operatorname{Re}(P_{j,j+1}^2 = 0)$  та  $\operatorname{Im}(P_{j,j+1}^2) = 0$  — ізотропні довжини у комплексному просторі [5].

#### 2.1.4 Побудова ізотропної плоскої кривої Без'є n-го порядку

Побудуємо ізотропну криву Без'є n-го порядку на основі умови ізотропності ланок характеристичного многокутника та хорди. Як результат, отримаємо:

$$\begin{cases} |p_{10}|^2 = 0 \\ \dots \\ |p_{n(n-1)}|^2 = 0 \\ |p_{0n}|^2 = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

З урахуванням виразу (2.6) координати точок будуть визначатися за допомогою умов:

$$\begin{cases} (x_{j+1} - x_j) = i(y_{j+1} - y_j) \\ (x_0 - x_n) = i(y_0 - y_n) \end{cases} \quad \text{або} \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} (x_{j+1} - x_j) = -i(y_{j+1} - y_j) \\ (x_0 - x_n) = -i(y_0 - y_n) \end{cases},$$

де  $j = 0 \dots (n-1)$ .

У випадку, коли крива Без'є n-го порядку визначається на основі ізотропних

ланок характеристичного багатокутника та ізоотропності хорди (2.6), одержимо криву з нульовою довжиною [5].

Для цього підставимо у вирази (2.2) умови (2.7) зі знаком “+”. Одержимо:

$$x(t) = \sum_{j=0}^n x_j J_{n,j}(t), \quad y(t) = y_0 + i \sum_{j=1}^n (x_j - x_0) J_{n,j}(t)$$

Коли візьмемо похідні:

$$x'(t) = n \sum_{j=0}^{n-1} (x_{j+1} - x_j) J_{n-1,j}(t),$$

$$y'(t) = i \left[ n(x_1 - x_0)(1-t)^{n-1} + \sum_{j=0}^{n-1} (x_{j+1} - x_j) J_{n-1,j}(t) \right],$$

$$J_{n-1,j}(t) = \frac{(n-1)!}{j!(n-1-j)!} t^j (1-t)^{n-1-j}.$$

Якщо проаналізувати значення  $x'(t)$  та  $y'(t)$ , то спостерігаємо, що вони відрізняються лише на уявну одиницю. Тобто одержимо  $x'^2(t) - y'^2(t) = 0$  [5].

Якщо при визначенні ординат для вершин знаки “+” та “-” у виразах (2.7) будуть чергуватися, тоді довжина кривої не буде ізоотропною [5]. У випадку, коли плоска ізоотропна крива Без’є  $n$ -го порядку побудована на основі ізоотропних сторін характеристичного багатокутника та ізоотропної хорди, тоді і кривина такої кривої буде дорівнювати 0. Таким чином, для ізоотропності кривини плоскої кривої необхідно щоб виконувалось співвідношення  $x'(t)y''(t) - y'(t)x''(t) = 0$ ,  $x'(t)^2 + y'(t)^2 \neq 0$  [5].

На основі попереднього виразу можна записати:  $y'(t) = ix'(t)$ .

Підставимо цю залежність і отримаємо:

$$x'(t)ix''(t) - ix'(t)x''(t) = 0.$$

Якщо для плоскої кривої багатокутник ізоотропний  $P_{j,j+1} = 0$  та хорда  $P_{0,n} = 0$ , тоді довжина кривої  $P_{kr}$  та кривина кривої  $k_{kr}$  в комплексному просторі дорівнюють нулю, а дійсні та уявні криві мають однакові довжини  $P_{REkr} = P_{IMkr}$  з рівними сторонами характеристичних багатокутників  $P_{j\text{Re},(1+j)\text{Re}} = P_{j\text{Im},(1+j)\text{Im}}$  та рівні кривини  $k_{REkr} = k_{IMkr}$  [5].

Розберемо формування ізоотропної кривої якщо задається дійсна її частина, тобто на площині будемо визначати плоску дійсну криву.

Для цього необхідно, щоб для виразів (2.4) та (2.5) виконувались наступні співвідношення [5]:

$$\operatorname{Re}(P_{j,j+1}^2) = 0, \quad \operatorname{Im}(P_{j,j+1}^2) = 0.$$

Тоді кількість рівнянь буде становити  $2n$ . Для визначення всіх координат необхідно додати ще дві умови, а саме уявні частини вектора  $p_0$ . В результаті одержимо [5]:

$$p_{j+1} = [\operatorname{Re}(x_{j+1}) \pm i \operatorname{Im}(x_{j+1}), \operatorname{Re}(y_{j+1}) \pm i \operatorname{Im}(y_{j+1})], \quad (2.8)$$

$$\text{де } \operatorname{Im}(x_{j+1}) = -\operatorname{Re}(y_{j+1}) + \operatorname{Im}(x_j) + \operatorname{Re}(y_j),$$

$$\operatorname{Im}(y_{j+1}) = \operatorname{Re}(x_{j+1}) - \operatorname{Re}(x_j) + \operatorname{Re}(y_j),$$

$$j = 0 \cdots (n-1).$$

Рівняння (2.8) є основним у розробленій програмній системі для розрахунку уявних частин координат опорних вершин ізоотропної кривої.

## 2.2 Моделювання плоскої ізометричної сітки на основі ізоотропної кривої Без'є третього порядку

Для визначення ізоотропної кривої скористаємося умовою (2.7) ізоотропності для сторін характеристичного багатокутника та довжини хорди [5]. Змоделюємо плоску сітку на основі ізоотропної кривої Без'є третього порядку за допомогою введеної конформної заміни параметра. Для цього підставимо в рівняння (2.2) вирази (2.7),  $n=3$  та  $t = u + iv$  [5]:

$$\begin{aligned} x(u + iv) = & x_0(1 - u - iv)^3 + 3x_1(1 - u - iv)^2(u + iv) + \\ & + 3x_2(1 - u - iv)(u + iv)^2 + x_3(u + iv)^3, \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} y(u + iv) = & y_0(1 - u - iv)^3 + 3(i(x_1 - x_0) + y_0)(1 - u - iv)^2(u + iv) + \\ & + 3(i(x_2 - x_1) + i(x_1 - x_0) + y_0)(1 - u - iv)(u + iv)^2 + (i(x_3 - x_2) + \\ & + i(x_2 - x_1) + i(x_1 - x_0) + y_0)(u + iv)^3. \end{aligned} \quad (2.10)$$



Виділимо дійсну частину в отриманій функції (2.9), (2.10) та проведемо дослідження. Визначимо внутрішню геометрію побудованої сітки. Для цього розрахуємо коефіцієнти першої квадратичної форми, які дадуть змогу оцінити довжини сегментів кривих, з яких складається сітка, кути між кривими та площі областей на сітці. Для цього візьмемо часткові похідні від  $\text{Re}(x(u + iv))$ ,  $\text{Re}(y(u + iv))$  [4]:

$$\begin{aligned}
 x_u(u, v) &= x_{u0}(u, v) + x_{u1}(u, v)u + x_{u2}(u, v)u^2, \text{ де} \\
 x_{u0}(u, v) &= 3(-(x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) + 2(x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}) - (x_{3\text{Re}} - x_{2\text{Re}}))v^2 + \\
 &\quad + 6((x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) - (x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}))v + 3(x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}), \\
 x_{u1}(u, v) &= 6(-(x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) + 2(x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}) - (x_{3\text{Im}} - x_{2\text{Im}}))v - \\
 &\quad - 6((x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) - (x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}})), \\
 x_{u2}(u, v) &= 3((x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) - 2(x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}) + (x_{3\text{Re}} - x_{2\text{Re}})); \\
 x_v(u, v) &= x_{v0}(u, v) + x_{v1}(u, v)u + x_{v2}(u, v)u^2, \text{ де} \\
 x_{v0}(u, v) &= 3((x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) - 2(x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}) + (x_{3\text{Im}} - x_{2\text{Im}}))v^2 + \\
 &\quad + 6((x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) - (x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}))v - 3(x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}), \\
 x_{v1}(u, v) &= 6(-(x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) + 2(x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}) - (x_{3\text{Re}} - x_{2\text{Re}}))v + \\
 &\quad + 6((x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) - (x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}})), \\
 x_{v2}(u, v) &= 3(-(x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) + 2(x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}) - (x_{3\text{Im}} - x_{2\text{Im}})); \\
 y_u(u, v) &= y_{u0}(u, v) + y_{u1}(u, v)u + y_{u2}(u, v)u^2, \text{ де} \\
 y_{u0}(u, v) &= 3((x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) - 2(x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}) + \\
 &\quad + (x_{3\text{Im}} - x_{2\text{Im}}))v^2 + 6((x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) - (x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}))v - 3(x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}), \\
 y_{u1}(u, v) &= 6(-(x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) + 2(x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}) - (x_{3\text{Re}} - x_{2\text{Re}}))v + \\
 &\quad + 6((x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) - (x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}})), \\
 y_{u2}(u, v) &= 3(-(x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) + 2(x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}) - (x_{3\text{Im}} - x_{2\text{Im}})); \\
 y_v(u, v) &= y_{v0}(u, v) + y_{v1}(u, v)u + y_{v2}(u, v)u^2, \text{ де} \\
 y_{v0}(u, v) &= -3(-(x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}) + 2(x_{2\text{Re}} - x_{1\text{Re}}) - (x_{3\text{Re}} - x_{2\text{Re}}))v^2 + \\
 &\quad - 6((x_{1\text{Im}} - x_{0\text{Im}}) - (x_{2\text{Im}} - x_{1\text{Im}}))v - 3(x_{1\text{Re}} - x_{0\text{Re}}),
 \end{aligned}$$

$$y_{v1}(u, v) = -6(-(x_{1Im} - x_{0Im}) + 2(x_{2Im} - x_{1Im}) - (x_{3Im} - x_{2Im}))v + \\ + 6((x_{1Re} - x_{0Re}) - (x_{2Re} - x_{1Re})),$$

$$y_{v2}(u, v) = -3((x_{1Re} - x_{0Re}) - 2(x_{2Re} - x_{1Re}) + (x_{3Re} - x_{2Re})).$$

Порівняємо одержані похідні:

$$x_{v0}(u, v) = y_{u0}(u, v), \quad x_{v1}(u, v) = y_{u1}(u, v),$$

$$x_{v2}(u, v) = y_{u2}(u, v), \quad x_{u0}(u, v) = -y_{v0}(u, v)$$

$$x_{u1}(u, v) = -y_{v1}(u, v), \quad x_{u2}(u, v) = -y_{v2}(u, v).$$

Тобто

$$x_v(u, v) = y_u(u, v), \quad x_u(u, v) = -y_v(u, v). \quad (2.11)$$

Рівняння (2.11) є аналогом умови Коши-Рімана [5].

### 2.3 Моделювання ізометричної поверхні на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку

Для моделювання поверхонь із визначеними диференціальними властивостями було розглянуто методи моделювання плоских ізотропних сіток.

Для побудови просторових сіток необхідно розширити можливості щодо моделювання кривих, а саме розглянути моделювання просторових кривих [1, 2, 4, 5].

Змоделюємо ізотропну криву Без'є n-го порядку на основі заданої аналітичної функції за методом Вейєрштрасса [18].

Криву Без'є будемо шукати у вигляді (2.2), де  $\mathbf{r}_j = [x_j \quad y_j \quad z_j]$

Нехай функція  $f(t)$  задана як:

$$f(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + \dots + a_nt^n,$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  — певні комплексні значення.

Розглянемо моделювання кубічної ізотропної кривої Без'є на основі кубічної аналітичної функції  $f(t)$ :

$$f(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3.$$

Розрахуємо коефіцієнти для ізотропної кривої Без'є третього порядку:

$$p(t) = p_0(1-t)^3 + 3p_1(1-t)^2t + 3p_2(1-t)t^2 + p_3t^3,$$

$$\text{де } p_0[(a_0 - a_2)i \quad a_0 + a_2 \quad -a_1i],$$

$$p_1[(a_0 - a_2 - a_3)i \quad a_0 + a_2 + a_3 \quad -a_1i],$$

$$p_2[(a_0 - a_2 - 2a_3)i \quad a_0 + a_2 + 2a_3 \quad (a_3 - a_1)i],$$

$$p_3[(a_0 - a_2 - 2a_3)i \quad a_0 + a_2 + 4a_3 \quad (3a_3 - a_1)i].$$

Для моделювання дійсної мінімальної поверхні [1, 2], підставимо

$$p_j = [x_{j\text{Re}} + x_{j\text{Im}} \quad y_{j\text{Re}} + y_{j\text{Im}} \quad z_{j\text{Re}} + z_{j\text{Im}}],$$

$$j = 0..n$$

у рівняння кривої Без'є третього порядку (1.1):

$$\begin{aligned} p_{\text{Re}}(u, v) = & p_{0\text{Re}}(1 - 3u + 3u^2 - 3v^2 - u^3 + 3uv^2) - \\ & - p_{0\text{Im}}(-3v + 6uv - 3u^2v + v^3) - (-3p_{1\text{Re}}(1 - 2u + \\ & + u^2 - v^2) + 3p_{1\text{Im}}(-2v + 2uv))u + (-3p_{1\text{Im}}(1 - 2u + \\ & + u^2 - v^2) - 3p_{1\text{Re}}(-2v + 2uv))v - (-3p_{2\text{Re}}(1 - u) - \\ & - 3p_{2\text{Im}}v)(u^2 - v^2) + (-3p_{2\text{Im}}(1 - u) + 3p_{2\text{Re}}v)uv + \\ & + p_{3\text{Re}}(u^3 - 3uv^2) - p_{3\text{Im}}(3u^2v - v^3) \end{aligned}$$

Загальна формула має вигляд:

$$\begin{aligned} p(u + iv) = & \text{Re}[p_0(1 - u - iv)^3 + 3p_1(1 - u - iv)^2(u + iv) + \\ & + 3p_2(1 - u - iv)(u + iv)^2 + p_3(u + iv)^3], \end{aligned}$$

$$\text{де } p_0[(a_0 - a_2)i \quad a_0 + a_2 \quad -a_1i],$$

$$p_1[(a_0 - a_2 - a_3)i \quad a_0 + a_2 + a_3 \quad -a_1i],$$

$$p_2[(a_0 - a_2 - 2a_3)i \quad a_0 + a_2 + 2a_3 \quad (a_3 - a_1)i],$$

$$p_3[(a_0 - a_2 - 2a_3)i \quad a_0 + a_2 + 4a_3 \quad (3a_3 - a_1)i].$$

Таким чином, ми отримали формули для підрахунку реальних і уявних координат опорних вершин просторової ізотропної кривої при моделюванні мінімальної ізометричної поверхні [2] на основі заданих ізотропних характеристик [4, 5], а також проаналізували виведення цих формул на кожному етапі моделювання мінімальної поверхні.

## 2.4 Моделювання просторової ізотропної кривої Без'є на основі деформації плоскoї кривої

Способом формоутворення просторових кривих є знаходження третьої координати на основі заданої плоскoї кривої. Ця методика призводить до застосування апроксимаційних методів. Змоделюємо просторову ізотропну криву на основі заданої плоскoї ізотропної кривої без застосування апроксимації.

Нехай плоска ізотропна крива Без'є  $n$ -го порядку побудована за допомогою виразів (2.5) та (2.8). Необхідно модифікувати плоску ізотропну криву таким чином, щоб її довжина в комплексному просторі залишалась сталою, тобто – ізотропною. Сторони характеристичного многокутника та хорда плоскoї кривої Без'є дорівнюють нулю, а для просторової кривої ця умова не зберігається, тому задіємо спосіб щодо зміни точок характеристичного многокутника з дотриманням умови ізотропності довжини кривої.

Кількість умов ізотропності для кривої Без'є  $n$ -го порядку складає  $(2n - 1)$ . Ці умови визначають кількість невідомих координат. Кількість координат для просторової кривої Без'є –  $3(n + 1)$ . Кількість координат, які необхідно задавати, дорівнюватиме  $3(n + 1) - (2n - 1) = n + 4$ . Будемо задавати відомі координати для просторової кривої таким чином:  $z_0, \mathbf{r}_j = [x_j \quad y_j]$ , де  $j = \frac{n+3}{2}$  [1].

Розглянемо першу умову ізотропності для кривої Без'є  $n$ -го порядку, а саме ізотропність сторони характеристичного многокутника, яка за напрямом збігається з дотичною в точці  $\mathbf{r}_0$ :  $\sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)^2 = 0$ . Згідно з вхідними початковими даними, невідомою в такому виразі залишається лише координата  $z_1$ . Враховуючи те, що для плоскoї кривої

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = 0 \quad (2.12)$$

перша умова матиме вигляд:

$$z_1 - z_0 = 0 \quad (2.13)$$

звідки будемо мати обов'язкове значення:  $z_1 = z_0$ .

Розглянемо другу умову:  $\sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)(r_2 - r_1) = 0$ . Підставляючи в даний вираз

співвідношення (2.12) та (2.13), одержимо тотожну рівність нулю. Отже, друга умова дозволяє задавати довільну координату  $z_2$ , яка визначається і залежить від порядку кривої. Наступні невідомі координати визначаються послідовною підстановкою координат, знайдених у попередніх рівняннях. Таким чином, одержуємо апарат, який дозволяє знаходити ізотропну криву Без'є  $n$ -го порядку без розв'язання системи квадратичних рівнянь (2.10).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)^2 = 0, \\ \sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)(r_2 - r_1) = 0, \\ 2 \sum_{r=x,y,z} (r_2 - r_1)^2 + \sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)(r_3 - r_2) = 0, \\ \sum_{r=x,y,z} (r_2 - r_1)(r_3 - r_2) = 0, \\ \sum_{r=x,y,z} (r_3 - r_2)^2 = 0. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

У результаті матимемо аналітичні вирази для кожної координати, тобто зміна точок в інтерактивному режимі не призводить до застосування чисельних методів.

Розглянемо деформацію на прикладі кубічної кривої Без'є. Для просторової кубічної кривої повинні виконуватись п'ять умов (2.14), тобто з 12 координат просторової кривої можна задати тільки 7. За початкові умови візьмемо ординати та абсциси трьох вершин характеристичного чотирикутника  $\mathbf{r}_j = [x_j \quad y_j]$ , де  $j = 0..2$  [1].

Підставимо поетапно в умови (2.14):

- в умову  $\sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)^2 = 0$  підставимо рівняння  $(x_1 - x_0) = i(y_1 - y_0)$ , одержимо  $z_1 = z_0$ ;

- в умові  $\sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)(r_2 - r_1) = 0$  введемо заміну  $(x_1 - x_0) = i(y_1 - y_0)$ ,

$(x_2 - x_1) = i(y_2 - y_1)$  та підставимо  $z_1 = z_0$ , будемо мати тотожність, яка надає можливість задавати будь-яке  $z_2$ ;

- проаналізуємо умову  $2 \sum_{r=x,y,z} (r_2 - r_1)^2 + \sum_{r=x,y,z} (r_1 - r_0)(r_3 - r_2) = 0$ . Підставимо

$(x_1 - x_0) = i(y_1 - y_0)$ ,  $(x_2 - x_1) = i(y_2 - y_1)$ ,  $z_1 = z_0$ , одержимо:

$$2(z_2 - z_1)^2 + (y_1 - y_0)(i(x_3 - x_2) + (y_3 - y_2)) = 0$$

Виразимо невідоме  $y_3$ , будемо мати:

$$y_3 = \frac{-2(z_2 - z_1)^2 - (x_1 - x_0)(x_3 - x_2)}{(y_1 - y_0)} + y_2$$

- спростимо вираз  $\sum_{r=x,y,z} (r_2 - r_1)(r_3 - r_2) = 0$ , підставляючи умову

$(x_2 - x_1) = i(y_2 - y_1)$ :

$$(y_2 - y_1)(i(x_3 - x_2) + (y_3 - y_2)) + (z_2 - z_1)(z_3 - z_2) = 0.$$

Підставимо в одержаний вираз знайдену координату  $y_3$ . Будемо мати:

$$z_3 = \frac{2(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}{(y_1 - y_0)} + z_2$$

- в умову  $\sum_{r=x,y,z} (r_3 - r_2)^2 = 0$  підставимо знайдене  $y_3$  та  $z_3$  й одержимо вираз

для  $x_3$ :

$$x_3 = \frac{-(z_2 - z_1)^2 - (y_2 - y_1)^2}{(x_1 - x_0)} + x_2$$

## 2.5 Висновки до розділу 2

Представлено теоретичне підґрунтя для обраного предмету дослідження – інформаційні технології моделювання ізотропних поверхонь.

Проаналізовано побудову плоских кривих на основі векторно-параметричного подання та виявлено основну проблему, пов'язану з побудовою кривої з нульовою довжиною.

Проведено необхідні дослідження для побудови плоских ізотропних відрізків, після чого було сформовано моделювання кривих Без'є на основі отриманих ізотроп-

них параметрів, а також виведено рівняння для визначення довжини характеристичного многокутника цієї кривої.

Визначення етапів побудови ізотропної плоскої кривої Без'є  $n$ -го порядку було застосовано для моделювання плоскої ізометричної сітки і дозволило описати спосіб формоутворення просторових кривих з подальшою можливістю відтворення даного моделювання на основі деформації плоскої кривої.

Отож, було проведено поступове наближення, починаючи від поняття “ізотропна крива” і прямуючи до поняття “ізотропна поверхня”, що допомагає вирішити поставлену задачу для досягнення кінцевої мети магістерської роботи.

### 3 ОПИС ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРАФІЧНОГО РЕДАКТОРУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ІЗОТРОПНИХ ПОВЕРХОНЬ

Графічний редактор моделювання складних ізотропних поверхонь отримав назву “Izoserfer”.

Одним із найважливіших завдань при розробці програмних продуктів є вибір таких засобів, які б полегшили роботу програміста, надавши всі необхідні інструменти для реалізації поставленого завдання, і дали б змогу отримати результат, який повністю задовольняє користувача [9].

Програмна реалізація системи [24] виконана згідно сучасних вимог до розробки програмного забезпечення [12]. Перш за все, було обрано засоби розробки, а саме мову програмування, середовище розробки, базу даних та систему контролю версій, а також було спроектовано діаграму класів майбутньої програмної системи [24].

#### 3.1 Засоби розробки програмної системи

Програмний додаток розроблено мовою програмування C# в середовищі Visual Studio 2019 [13]. Система включає в собі реалізацію клієнт-серверної архітектури (рисунк 3.1) [16].

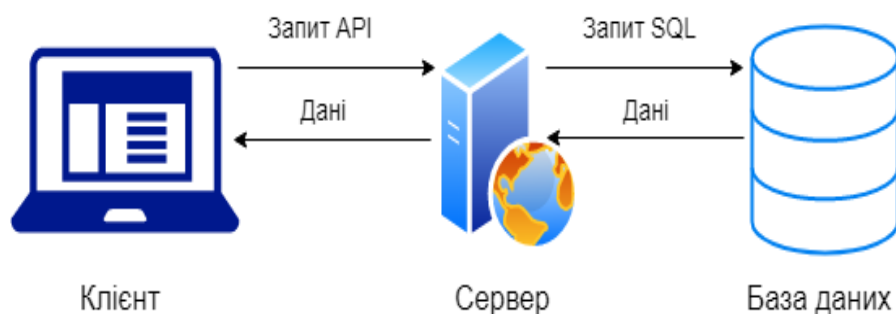


Рисунок 3.1 — Структура клієнт-серверного додатку

Структура програмної системи представлена на рисунку 3.2.



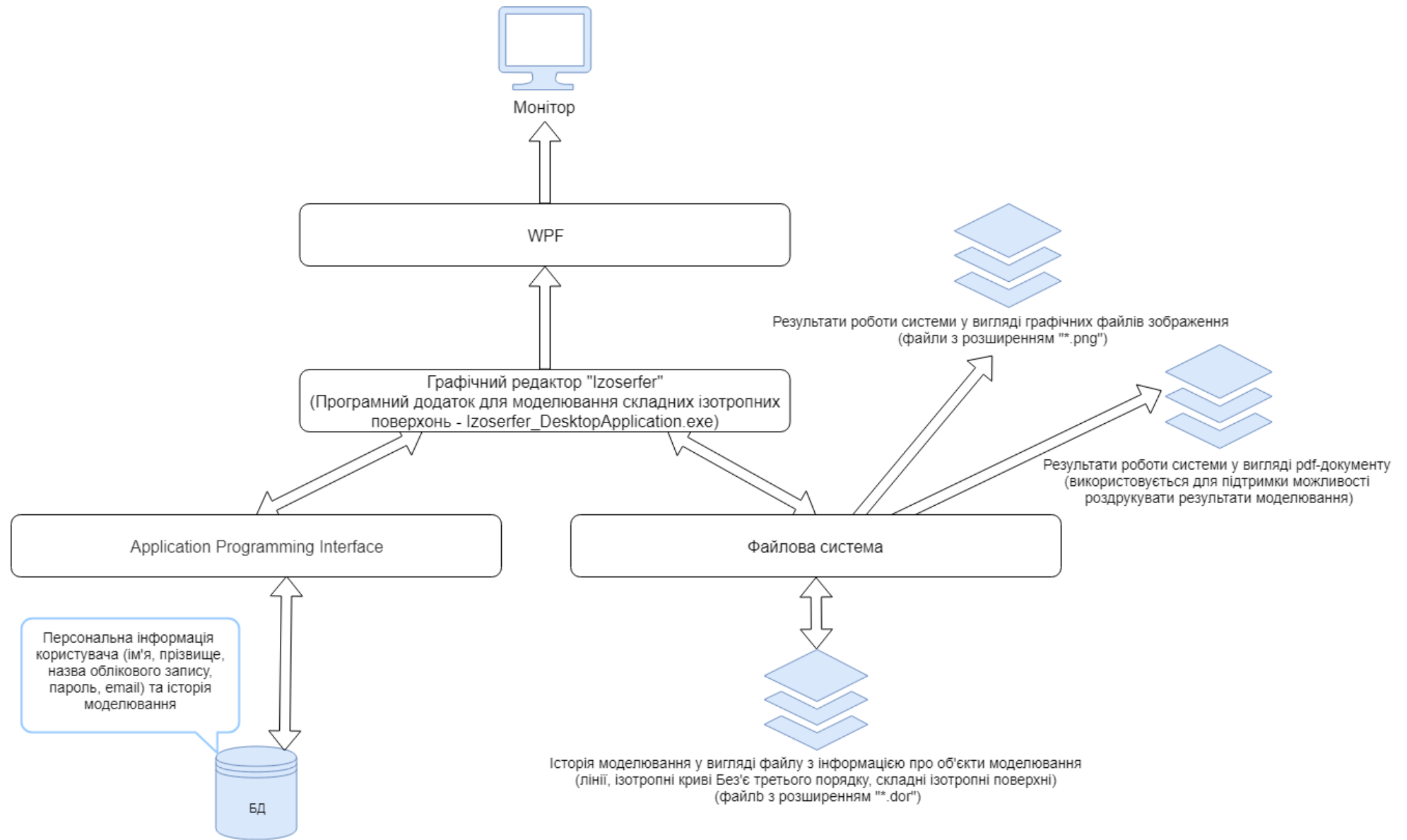


Рисунок 3.2 — Структура програмної системи

Сервером є абстрактна мережева сутність для отримання HTTP-запитів, їх обробки і повернення відповідей. Клієнтом є десктопний додаток, який налаштований таким чином, що формує і відправляє HTTP-запити серверу. Проте, архітектура системи зберігає обособлення сервера та клієнта – вони можуть бути замінені іншими, що не буде відображати змін для їх внутрішніх процесів, оскільки їх сигнатура залишається сталою. Сервер абстрогується від клієнту та його станів [16].

Програмний продукт включає в собі спосіб знаходження архітектурного рішення побудови мережевих протоколів для доступу до інформації, а саме – REST. REST є елементарний інтерфейс для керування даними, що припускає певні методи взаємодії з сервером: отримання даних (GET), зберігання (POST), модифікація (PUT/PATCH) і видалення (DELETE). Також, REST дозволяє залучити обробку запитів, сегрегація доступу до даних і валідацію вхідних даних, що сервер опрацьовує в першу чергу і лише потім виконує запит клієнта [16].

Сервер системи реалізовано за допомогою фреймворку ASP.NET Core 2.2, який є вільним та відкритим програмним забезпеченням потужного підґрунтя веб застосунків і є новою технологією, яка включає ASP.NET MVC та ASP.NET Web API у єдину програмну модель. Серверна частина має налаштування для взаємодії з базою даних Remote MySQL, яка представляє собою вільну систему керування реляційними базами даних та реалізує право на віддалену можливість керування даними. Конфігурація взаємодії з БД відбувається за допомогою ADO.NET Entity Framework (EF), який є об'єктно-орієнтованою технологією доступу до даних, є object-relational mapping (ORM) рішенням від Microsoft. EF надає можливість керувати об'єктами шляхом застосування LINQ to Entities, або з використанням Entity SQL. З ціллю зменшити зусилля прикладені для створення web-рішень обирають ADO.NET Data Services або взаємодію з Windows Communication Foundation і Windows Presentation Foundation, що надають змогу створювати багаторівневі програмні додатки, застосовуючи один зі способів проектування MVC, MVP або MVVM. Для даної системи в якості клієнта було обрано WPF, оскільки основною метою є створення десктопного графічного редактору. WPF є потужним об'єктно-орієнтованим функціональним шаром, що надає можливість реалізовувати двовимірні та тривимірні інтерфейси [13, 15].

## 3.2 Опис системи контролю версій

Система контролю версій дає можливість запам'ятовувати минулі версії файлів та відтворювати їх у разі необхідності. Вона включає всі дані про версію кожного з файлів, а також всю архітектуру проекту на будь-якому етапі реалізації, що є дуже цінним у розробці проекту. Місце розташування файлів має назву репозиторій. На сьогоднішній день існує дві головних системи для керування репозиторіями: Git та Mercurial [17].

Git є розповсюдженим, гнучким інструментом для керування версіями, що надає широкий спектр засобів для впровадження нелінійного типу розробки, які ґрунтуються на від'єднанні і сполученні гілок. З метою зберігання повної історії та протистояння змінам попереднім числом застосовуються методи криптографічного типу, при цьому, є можливість сполучення за допомогою інформаційних підписів розробників до тегів і комітів. Найбільш використовуваними представниками даної системи можна назвати GitHub та GitLab.

Для використання в межах проекту було обрано платформу GitHub, що є найпопулярнішою системою керування репозиторіями програмного коду. Репозиторій з програмним кодом системи має публічний доступ та знаходиться за посиланням: “[https://github.com/Doroshchuk/Izoserfer\\_DesktopApplication.git](https://github.com/Doroshchuk/Izoserfer_DesktopApplication.git)”.

## 3.3 Діаграма класів

З метою організації правильного процесу розробки програмного забезпечення, перш за все, було спроектовано діаграму класів майбутньої системи, яка, безпосередньо, стала ключовою основою при написанні програмного модулю проекту.

Діаграма класів програмної системи для моделювання ліній, ізотропних кривих, криволінійних обводів й складних ізотропних поверхонь на основі кривої Без'є третього порядку представлена на рисунку 3.3. Впроваджена архітектура допомагає системі підтримувати можливість до масштабування та гнучкість при реалізації додаткових або у випадку використання вже існуючих об'єктів.

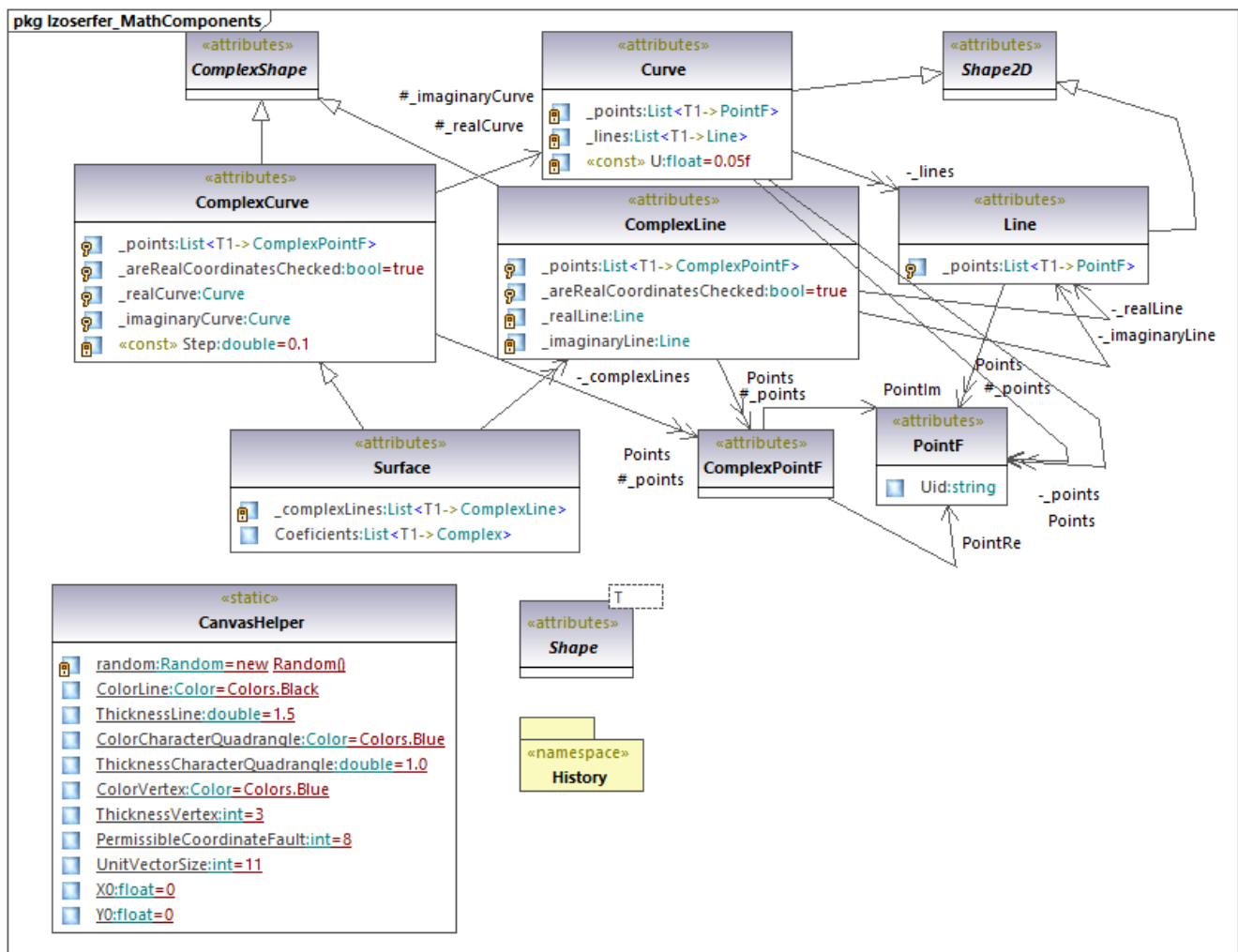


Рисунок 3.3 — Діаграма класів

Діаграма класів повністю відтворює структуру розробленого програмного забезпечення, демонструючи основні ідеї об'єктно-орієнтованого програмування, ключові парадигми якого були втілені при реалізації системного продукту.

### 3.4 Діаграма послідовностей модулю аутентифікації користувача

Оскільки програмна система передбачає можливість створення облікового запису користувача, то було реалізовано модулі реєстрації, авторизації та аутентифікації, а також збереження історії моделювання на графічному полотні. Отож, діаграма послідовностей модулю аутентифікації представлена на рисунку 3.4.

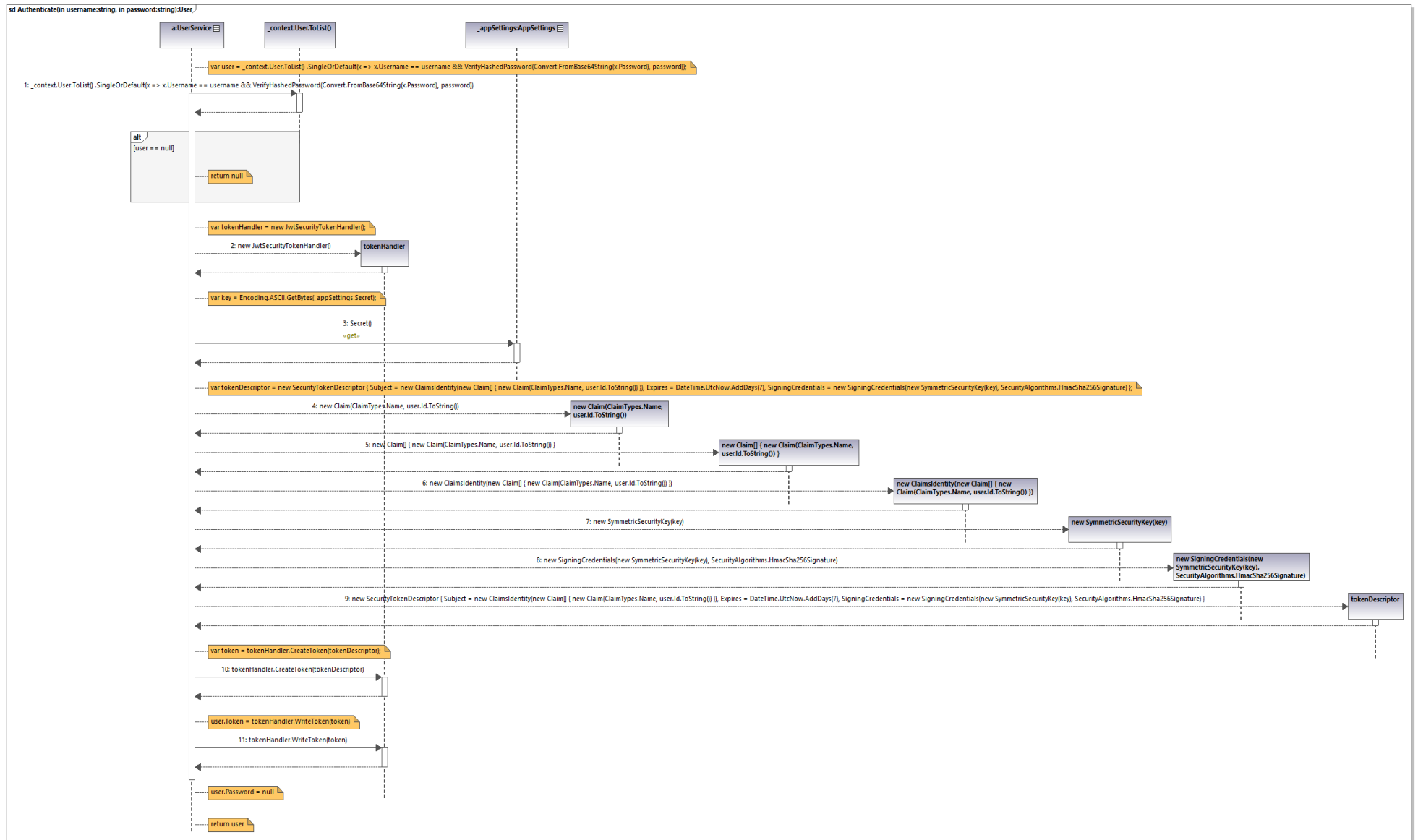


Рисунок 3.4 — Діаграма послідовностей модулю аутентифікації користувача

Оскільки програмний додаток передбачає наявність облікових записів користувачів, необхідно було реалізувати процес аутентифікації для безпечного та захищеного доступу до персональних даних користувача.

### 3.5 Схема таблиць бази даних

Оскільки, в якості БД було обрано Remote MySQL, яка виступає реляційною БД, що означає сукупність нормалізованих відношень, тоді, в даному випадку, це є набір одиниць даних, об'єднаних у вигляді сукупності формально зображених таблиць, збережена інформація в яких є доступною або попередньо зібраною іншими методами без видозміни таблиць бази даних. Нижче наведено схему таблиць бази даних для графічного редактора “Izoserfer” (рисунок 3.5).

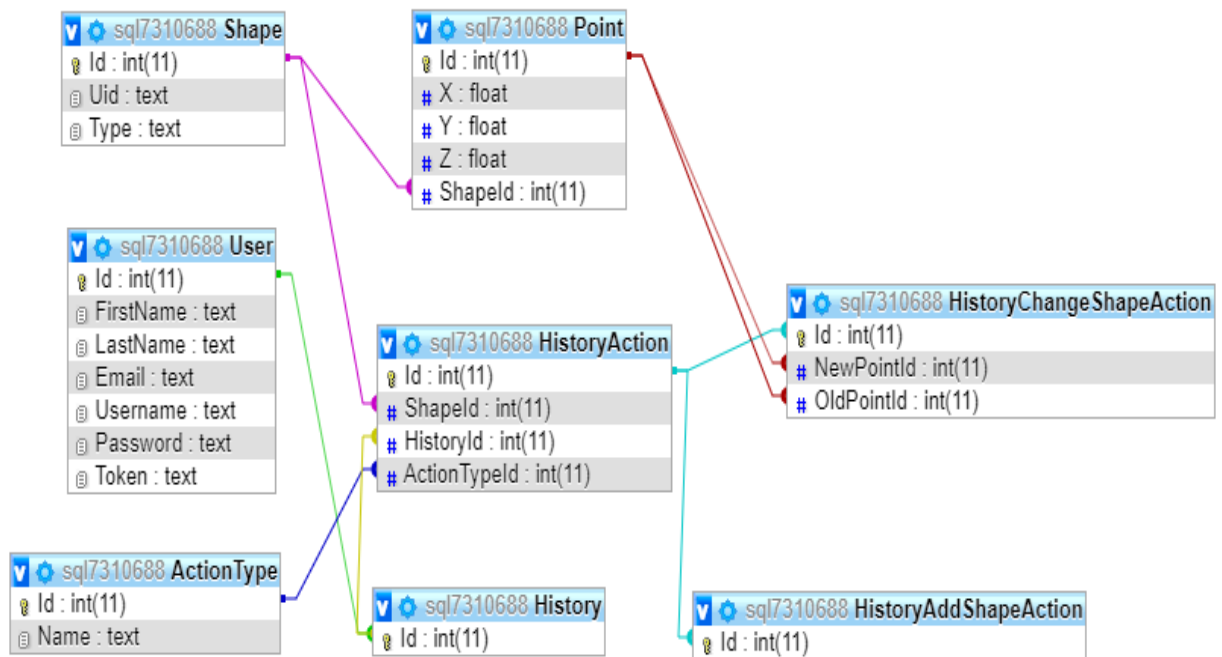


Рисунок 3.5 — Схема таблиць БД

Згідно зі схемою програмний продукт надає можливість зберігати інформацію про обліковий запис користувача, в тому числі персональні дані користувача, які заповнюються ним при реєструванні у додатку, а також історію моделювання для конкретного облікового запису.

### 3.6 Опис програмного модулю побудови ізотропної кривої Без'є третього порядку

Архітектурою програмного додатку передбачено клас-шаблон “Shape”, двома більш базовими генераціями якого виступають абстрактні класи “Shape2D” та “ComplexShape” для створення більш конкретних класів з можливістю містити звичайні характеристики точок та точок з ізотропними властивостями.

Побудова кривої Без'є третього порядку базується на множині ліній зі значенням параметра  $t$  близько 0,1. Для цього було написано власний клас “Curve”, який наслідує клас “Line” і містить набір точок типу “PointF” для визначення чотирьох опорних вершин кривої. У класі “Curve” було реалізовано методи підрахунку точок на кривій, а також метод підрахунку ліній на цій кривій, опираючись на знайдену раніше кількість її точок. Клас “ComplexPointF” допомагає зберігати інформацію про опорну вершину кривої із застосуванням комплексного числа і містить два головних поля типу “PointF”, визначених як точка з реальними координатами і точка з уявними координатами вершини. Клас “ComplexPointF” дозволяє обчислити уявні координати кожної наступної точки.

Система передбачає можливість вибору типу координат завдяки зберіганню відповідних значень координат вершин обох типів у структурі даних “List”, відповідно, для кожної з фігур, яка наслідується від класу “Shape”.

### 3.7 Опис програмного модулю побудови плоскої ізометричної сітки

Для моделювання плоскої ізометричної сітки було дотримано дві головні умови: умову ортогональності та умову ізометричності кривих. Було введено конформну заміну в рівняння ізотропної кривої (2.4) і (2.5) та програмно отримано формулу (2.9), (2.10). У структуру системи для реалізації заміни було додано наступні класи: “ComplexLine”, “ComplexCurve”. Побудова сітки відбувається завдяки двом циклам відносно  $u$  та  $v$  з кроком 0,1. Даний модуль втілений для наступного модулю побудови ізотропної поверхні.

### 3.8 Опис програмного модулю побудови мінімальної поверхні на основі просторової кривої

Для демонстрації просторової кривої на екрані монітора було застосовано паралельне проєкціювання, а саме косокутну проєкцію Кавальє (вільна проєкція) [7]. Даний вид проєкціювання передбачає, що проєкція відрізка, який паралельний площині проєкціювання, має ту ж саму довжину, що і сам відрізок, тобто відсутні скорочення:  $P_x = \cos(\frac{\pi}{4})$ ,  $P_y = \sin(\frac{\pi}{4})$ . Отож, клас “Surface” містить реалізацію проєкціювання Кавальє завдяки власноруч створеному методу “ExecuteCavalierProjection”.

### 3.9 Опис програмного модулю для збереження історії моделювання для конкретного облікового запису користувача

Для впровадження модулю збереження історії змін моделювання фігур на полотні було реалізовано архітектуру збереження дій користувача. На даному етапі програмний додаток передбачає можливість збереження дії додавання фігури на полотно, за яку відповідає клас “AddShapeAction”, а також можливість модифікувати вже існуючу фігуру шляхом перезадання координат її точкам, за що відповідає клас “ChangeShapeAction”. Взагалі архітектура даного модулю побудована таким чином, що дозволяє легко додавати новий функціонал, а в конкретному випадку, нові дії для збереження в історію. Отож, передбачено базовий абстрактний клас “HistoryAction”, який налаштовує необхідність усім своїм наслідникам реалізувати функціонал двох базових методів “Apply()” та “Reset()”. Таким чином, в класі “CanvasHistory” встановлено властивість “Actions” типу список “HistoryAction”, в чому проявляється така парадигма ООП як поліморфізм, адже, ми маємо змогу зберігати сутності, які реалізують набір контракту базової сутності. Оскільки тепер у нас є доступ до всіх об’єктів дій, ми легко можемо або видалити всі дії, або навпаки відтворити всі дії, викликавши для кожного елементу з “List<HistoryAction>” метод “Apply()”.



### 3.10 Висновки до розділу 3

Описано засоби розробки графічного редактора “Izoserfer”. Програмний додаток реалізовано мовою програмування C# в р

Visual Studio 2019, додаток підтримує клієнт-серверну архітектуру (рисунок 3.1), при цьому сервер базується на фреймворку ASP.NET Core 2.2 та передбачає взаємодію з базою даних Remote MySQL, а в якості клієнта обрано WPF. Програмний код розробленої системи моделювання написано ітераційним підходом, з затосуванням системи контролю версій GitHub.

З метою налагодження правильного процесу розробки програмного забезпечення, було спроектовано структуру програмного додатку (рисунок 3.2) та діаграму класів (рисунок 3.3), яка повністю відтворює основну структуру моделювання ліній, ізотропних кривих і криволінійних контурів та складних ізотропних поверхонь. Представлено діаграму послідовностей (рисунок 3.4) для модулю аутентифікації користувача у системі.

Реалізовано можливість зберігати інформацію про обліковий запис користувача у базу даних (рисунок 3.5), в тому числі персональні дані користувача та історію моделювання в межах цього запису.

Розділ включає в себе опис головних програмних модулів для моделювання ґрунтуючись на теоретичній основі, наданій у другому розділі записки.

## 4 ОПИС ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

При розробці програмного забезпечення для кінцевого користувача, головний акцент було зроблено на простоті та зручності під час користування програмним забезпеченням, що є ключовими моментами в ході експлуатації будь-якого програмного забезпечення.

### 4.1 Системні вимоги

Для коректної роботи розробленої десктопної програми на персональному комп'ютері не має необхідності встановлювати жодну додаткову програму.

Файл програмного забезпечення збережений з розширенням “.exe” і легко запускається за допомогою подвійного кліку мишкою користувача на іконку файла програмної системи.

### 4.2 Робота користувача з програмною системою

При завантаженні програмного додатку з'являється головне вікно (рисунок 4.1) з формою авторизації користувача “Sign In”, яка складається з двох текстових полів: “Username”, “Password” та кнопки “Sign In”.

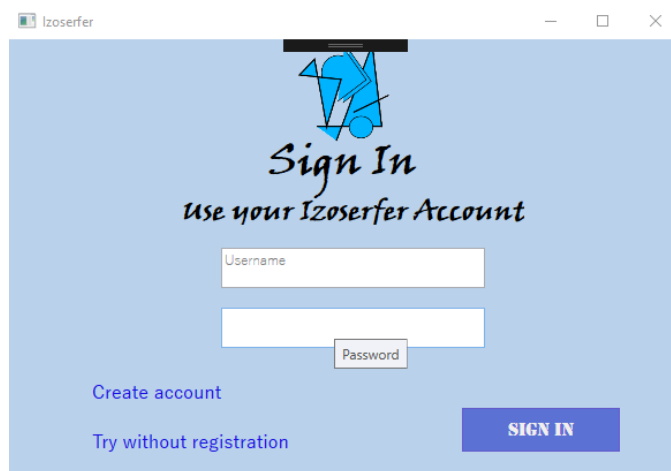


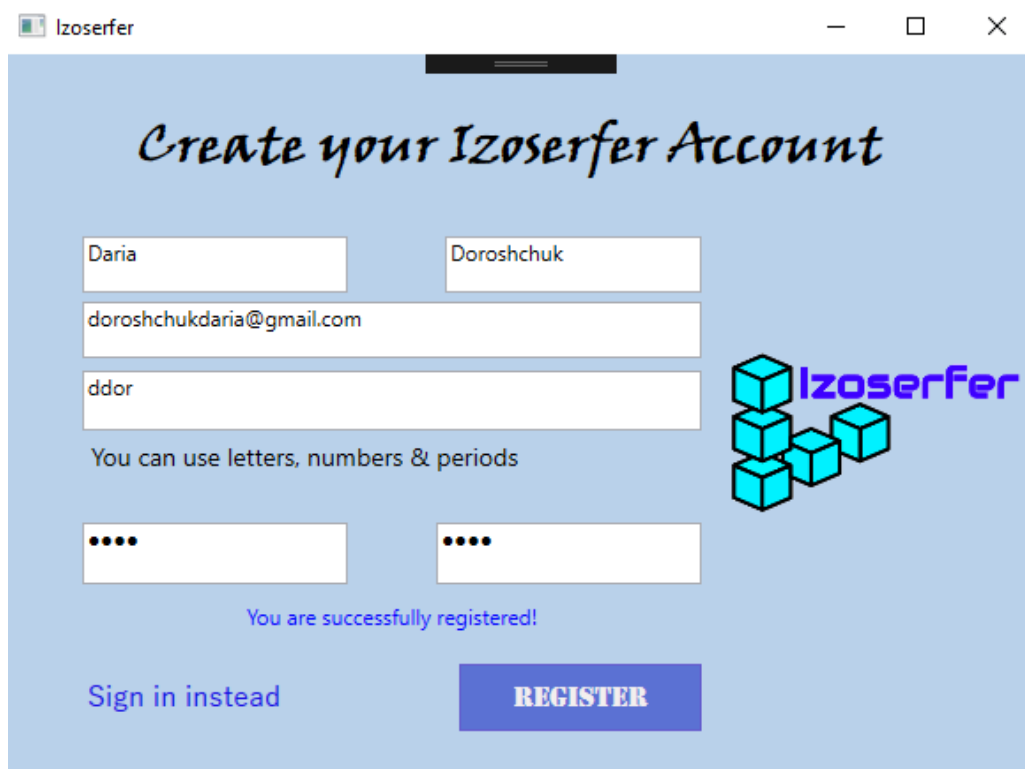
Рисунок 4.1 — Форма авторизації користувача “Sign In”

Також на формі присутні посилання “Create account” на форму реєстрації користувача (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 — Форма реєстрації користувача “Create your Izoserfer Account”

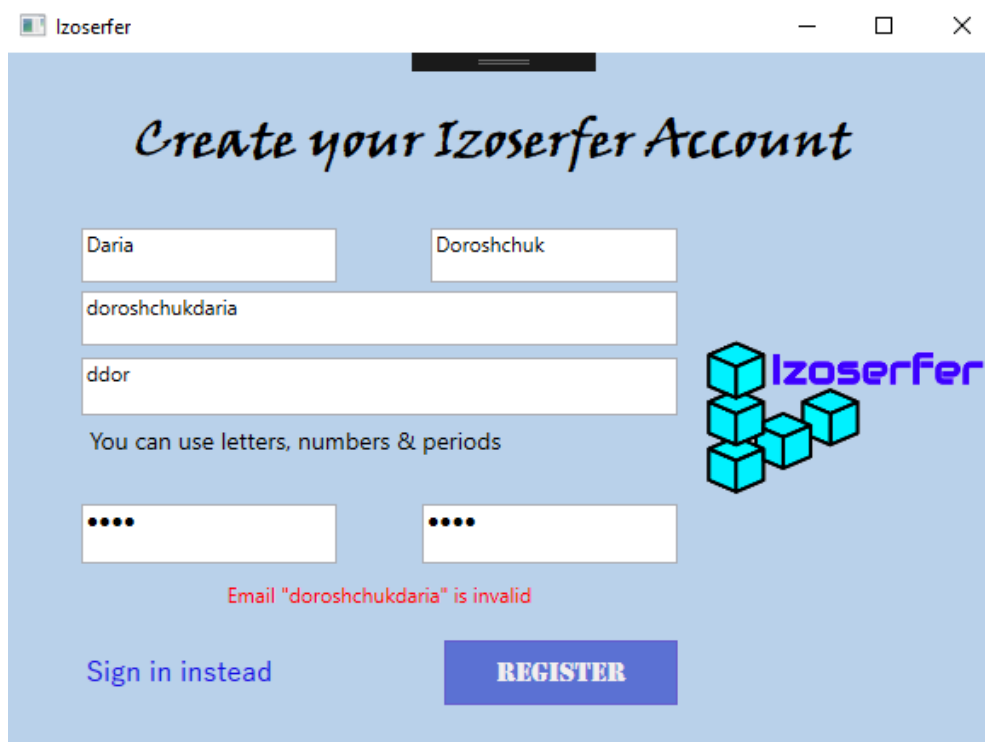
Форма реєстрації користувача містить шість текстових полів: “Firstname”, “Lastname”, “Email”, “Username”, “Password”, “Confirm password” та кнопку “Register” для реєстрації вказаної користувачем інформації у базі даних програмного додатку. В разі успішного створення облікового запису користувача, що означає, що в ході обробки запиту на створення запису не було виявлено помилок, з’являється повідомлення, яке відтворює інформацію про вдале реєстрування у системі (рисунок 4.3). Але, у випадку, якщо під час обробки інформації, наданої користувачем було виявлено певні помилки або неточності – на формі реєстрації з’являється повідомлення з конкретним сповіщенням про помилку (рисунок 4.5). Програмний додаток передбачає наступні можливі ситуації допущення помилок при вказанні персональної інформації користувачем: електронна пошта задана у невірному форматі, значення поля “Password” не збігається зі значенням поля “Confirm Password”, у системі вже існує користувач з такою електронною адресою.

Також передбачено можливість переходу на форму авторизації за допомогою посилання “Sign in instead”.



The screenshot shows a web browser window titled 'Izoserfer'. The page has a light blue background and a black header bar. The main heading is 'Create your Izoserfer Account' in a stylized, cursive font. Below the heading are several input fields: 'Daria' and 'Doroshchuk' (first and last names), 'doroshchukdaria@gmail.com' (email), and 'ddor' (password). A note below the password field states 'You can use letters, numbers & periods'. There are two more password fields, each with four dots indicating masked characters. To the right of the form is the 'Izoserfer' logo, which consists of several blue cubes stacked together. Below the form, there is a blue button labeled 'REGISTER' and a link labeled 'Sign in instead'. A green message 'You are successfully registered!' is displayed below the password fields.

Рисунок 4.3 — Форма реєстрації користувача “Create your Izoserfer Account” після успішного створення облікового запису користувача



The screenshot shows the same 'Create your Izoserfer Account' registration form as in Figure 4.3. However, the email field now contains 'doroshchukdaria' instead of the full email address. A red error message 'Email "doroshchukdaria" is invalid' is displayed below the email field. The 'REGISTER' button is still present, and the 'Sign in instead' link is also visible. The 'Izoserfer' logo and the heading remain the same.

Рисунок 4.4 — Форма реєстрації користувача “Create your Izoserfer Account” в разі допущення помилок при вказанні персональної інформації користувача

Слід звернути увагу, що програмний додаток передбачає можливість спробувати графічний редактор не реєструючись у системі (рисунок 4.5) у випадку переходу за посиланням “Try without registration” на формі авторизації (рисунок 4.1). В такому випадку, незареєстрованому користувачеві доступний основний функціонал редактору.

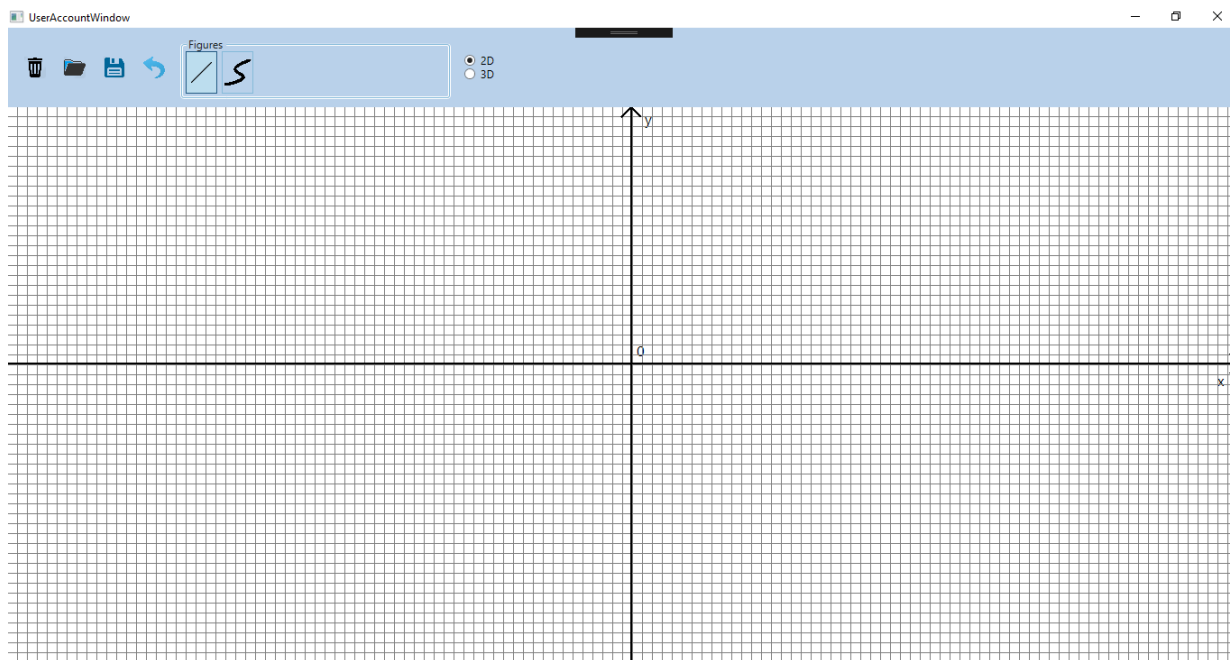


Рисунок 4.5 — Головне вікно системи для незареєстрованого користувача

Головні елементи інтерфейсу сторінки: графічне полотно, панель інструментів, що включає в себе кнопку для зберігання виконаної користувачем роботи у файл з розширенням “\*.dor” (рисунок 4.6), кнопку для відкриття файлу (рисунок 4.7), кнопку для очищення графічного полотна (рисунок 4.8), кнопку для відміни попередніх дій (рисунок 4.9) та кнопки-перемикачі для встановлення режиму моделювання в середовищі 2D бо 3D (рисунок 4.10). Відповідно до встановленого режиму середовища моделювання відображається запропонований набір фігур. Для середовища 2D передбачено можливість побудови плоских ліній та плоских ізотропних кривих Без’є третього порядку (рисунок 4.11).



Рисунок 4.6 — Кнопка для збереження у файл



Рисунок 4.7 — Кнопка для відкриття файлу



Рисунок 4.8 — Кнопка для очищення графічного полотна



Рисунок 4.9 — Кнопка для відміни попередніх дій

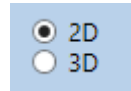


Рисунок 4.10 — Кнопки-перемикачі для встановлення середовища моделювання



Рисунок 4.11 — Кнопки-перемикачі для встановлення режиму моделювання в 2D середовищі (обрання типу фігури)

В разі вибору 3D середовища, інтерфейс сторінки набуває певних видозмін, які представлено на рисунку 4.12, а саме — у зміні координатних осей та переліку фігур для моделювання (рисунок 4.13), адже тепер користувачеві доступне моделювання складних ізотропних поверхонь на основі ізотропної просторової кривої Без'є третього порядку шляхом деформації плоскої кривої.

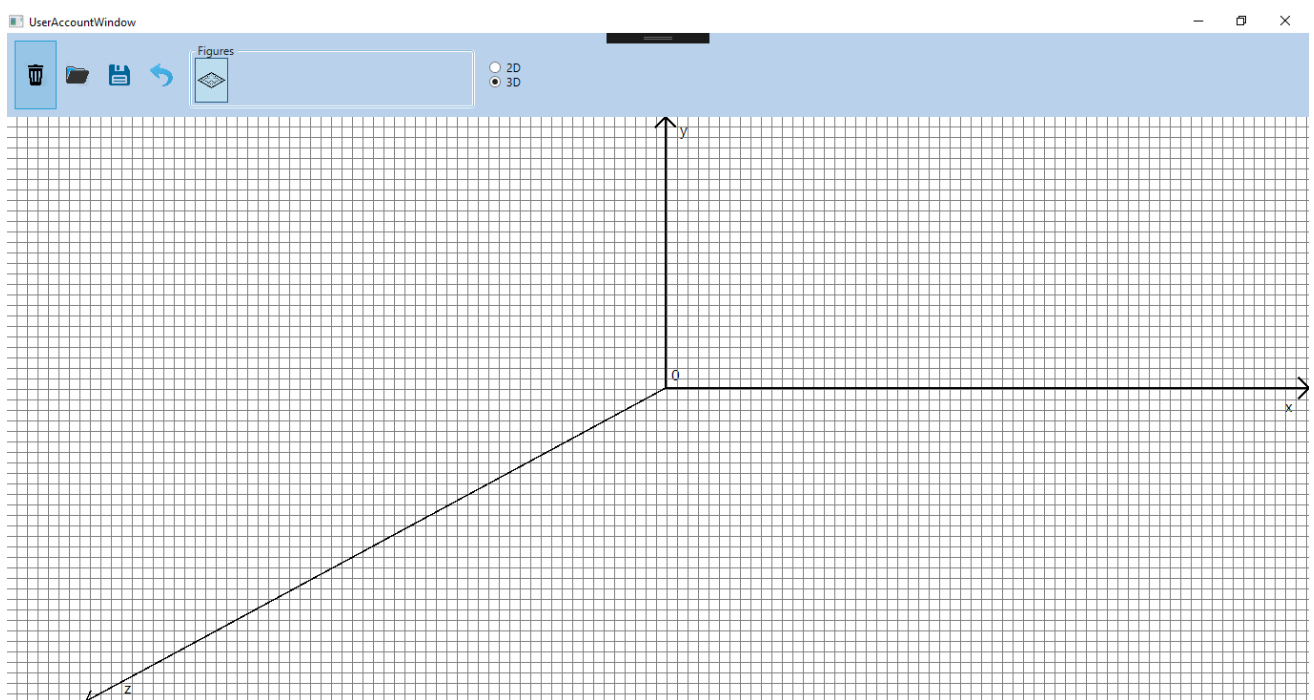


Рисунок 4.12 — Головне вікно системи для незареєстрованого користувача після вибору 3D середовища



Рисунок 4.11 — Кнопки-перемикачі для встановлення режиму моделювання в 3D середовищі (обрання типу фігури)

На рисунку 4.12 подано приклад моделювання криволінійного контуру в середовищі 2D за допомогою плоских ізотропних кривих Без'є третього порядку.

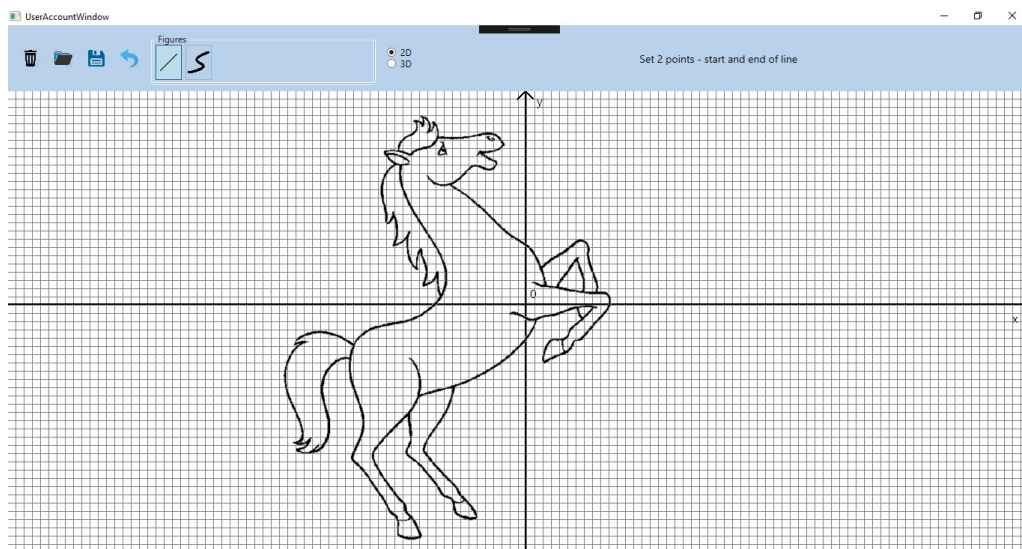


Рисунок 4.12 — Приклад виконання моделювання криволінійного контуру у вигляді коня за допомогою плоских ізотропних кривих

На рисунках 4.13, 4.14 подано приклад моделювання складної фігури в середовищі 2D за допомогою ліній.

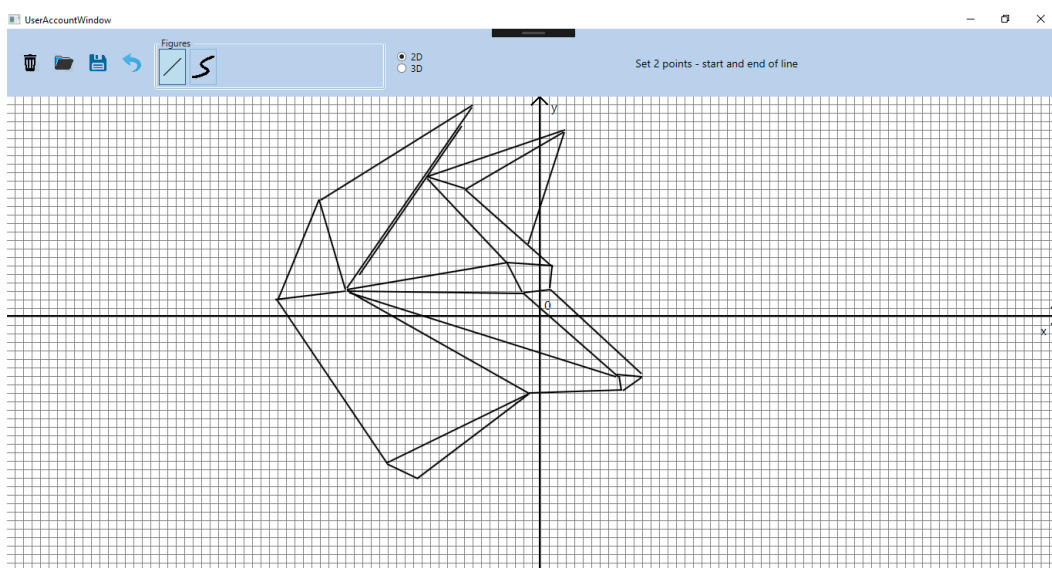


Рисунок 4.13 — Приклад виконання моделювання складної фігури у вигляді вовка за допомогою ліній

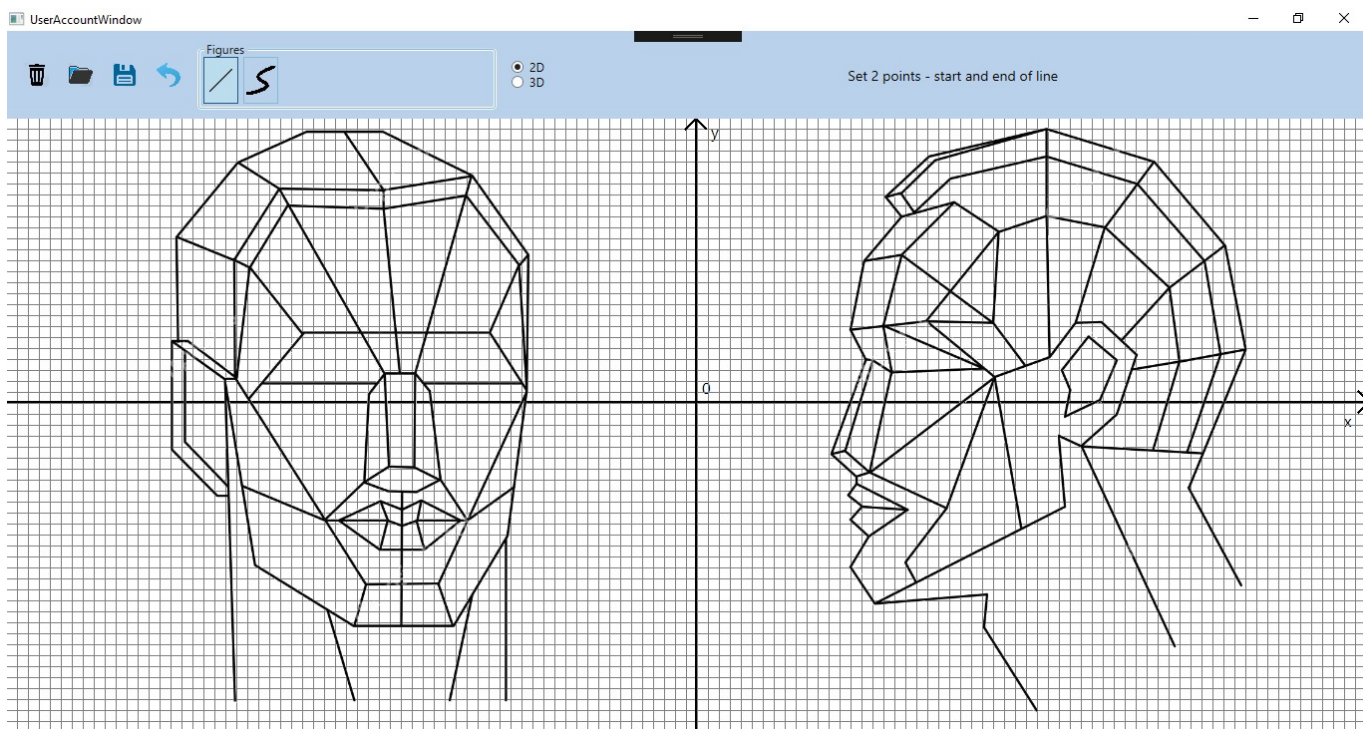


Рисунок 4.14 — Приклад виконання моделювання складної фігури у вигляді обличчя людини за допомогою ліній

При роботі з ізотропною плоскою або просторовою кривою передбачено можливість відобразити допоміжний чотирикутник (рисунок 4.15) та реальну або уявну складову фігури (рисунок 4.16).

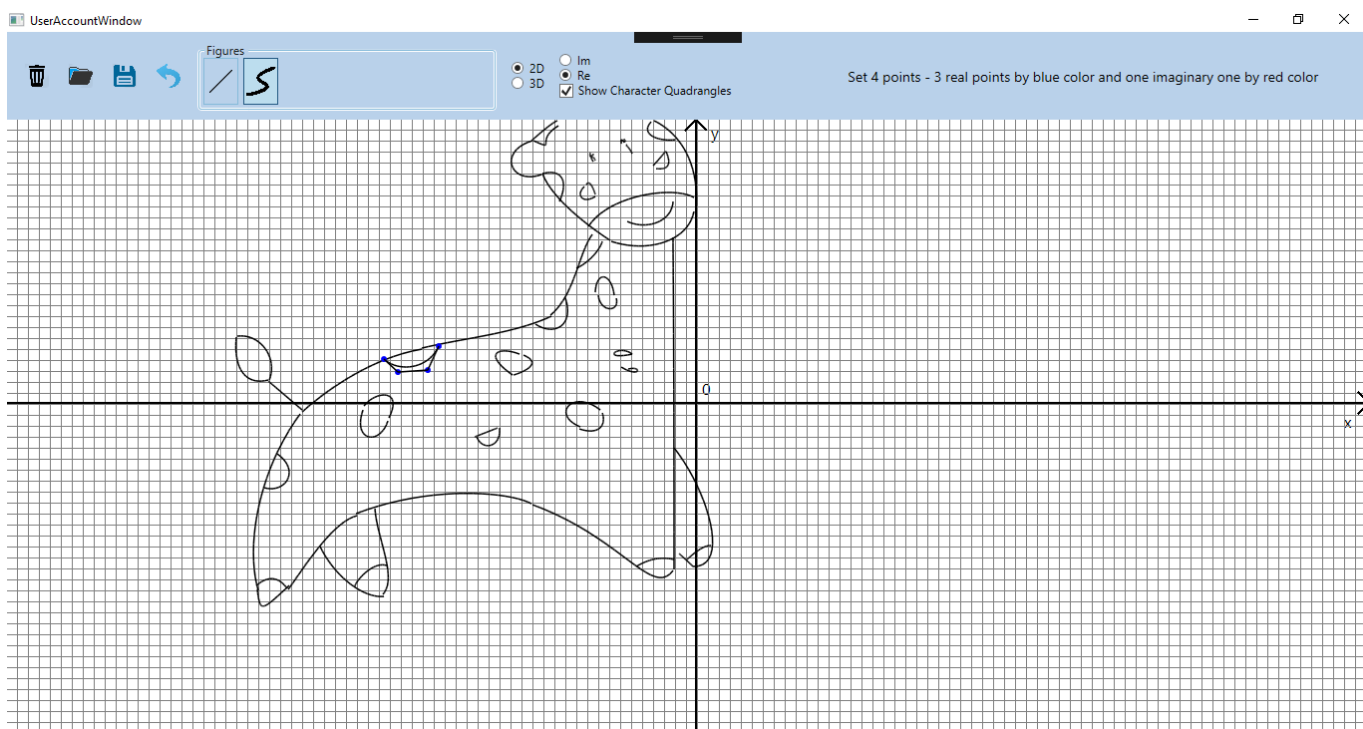


Рисунок 4.15 — Приклад виконання моделювання з відображенням допоміжного чотирикутника для плоскої ізотропної кривої Без'є третього порядку



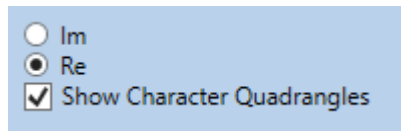


Рисунок 4.16 — Панель налаштування характеристик відображення для кривих/поверхонь з ізотропними властивостями

На рисунку 4.17 представлено приклад моделювання ізотропної поверхні на основі кривої Без'є третього порядку. При побудові поверхні програма автоматично відображає її реальну складову (рисунку 4.17), проте завдяки панелі налаштування, зміст якої було розглянуто вище (рисунку 4.16), маємо можливість переключитись для відображення уявної складової ізотропної поверхні (рисунку 4.18). Так програмний додаток надає можливість вибрати поверхню, лінію або плоску криву для модифікації за допомогою взаємодії користувача з графічним полотном, тобто забезпечено функціонал для перехоплення подій взаємодії з полотном.

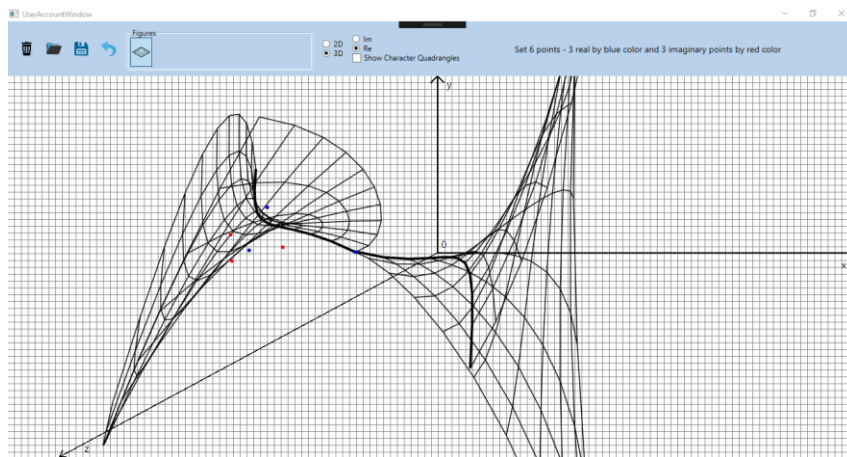


Рисунок 4.17 — Приклад виконання моделювання складної ізотропної поверхні на основі кривої Без'є третього порядку

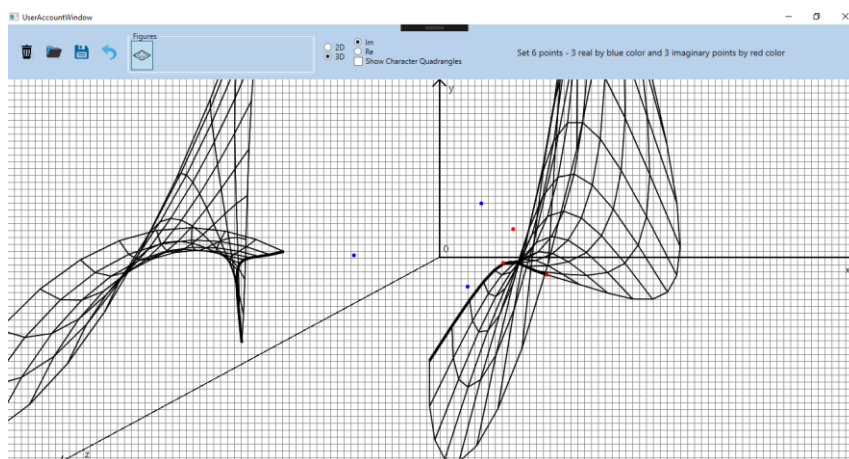


Рисунок 4.18 — Приклад відображення уявної складової ізотропної поверхні

На рисунках 4.19-4.21 приведено приклади моделювання складних ізотропних поверхонь у вигляді шару, медузоподібної фігури та дзвоника на основі ізотропної просторової кривої Без'є третього порядку шляхом деформації плоскої кривої.

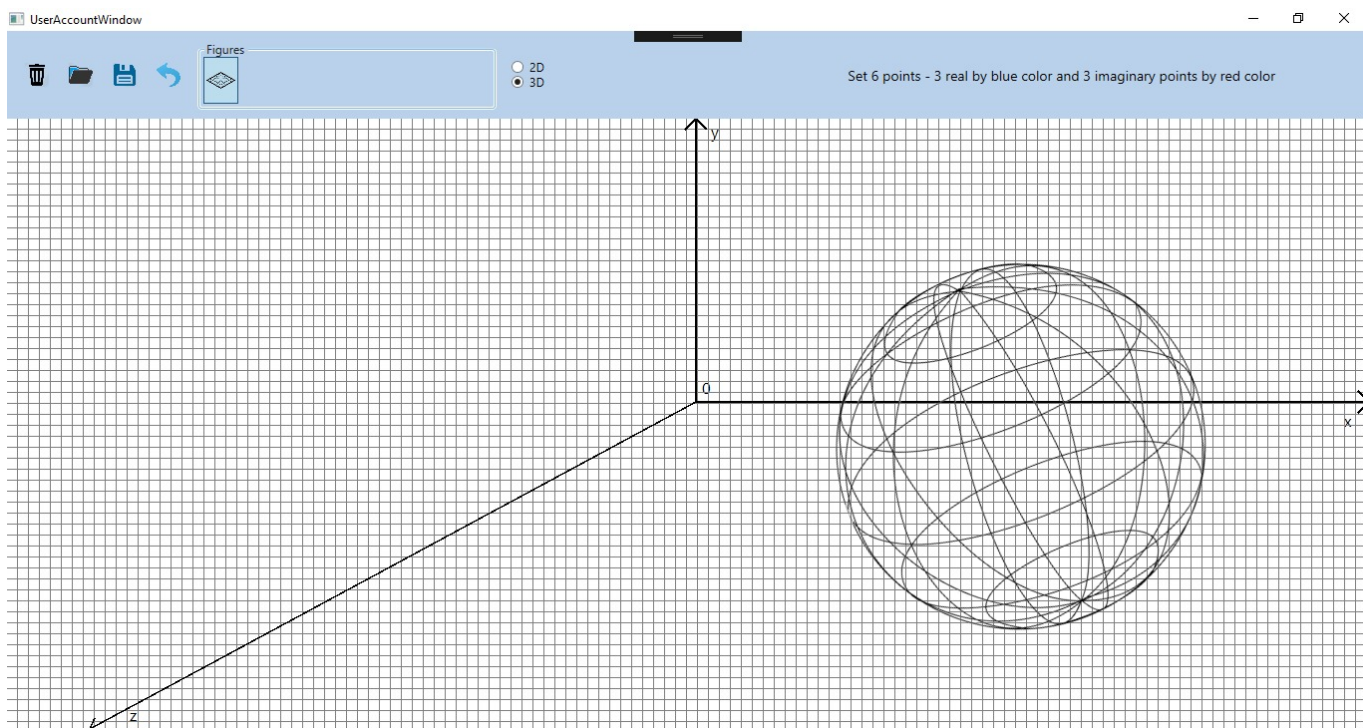


Рисунок 4.19 — Приклад виконання моделювання складної ізотропної поверхні у вигляді шару

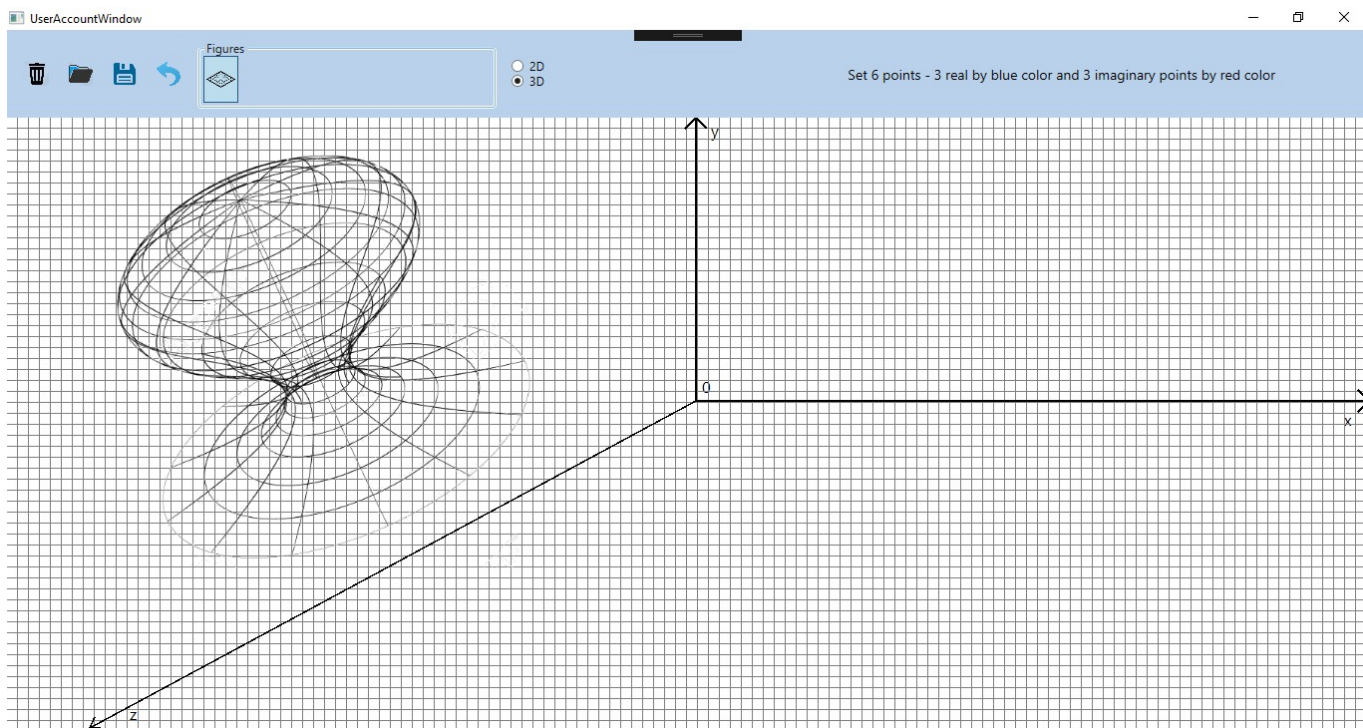


Рисунок 4.20 — Приклад виконання моделювання складної ізотропної поверхні у вигляді медузоподібної фігури

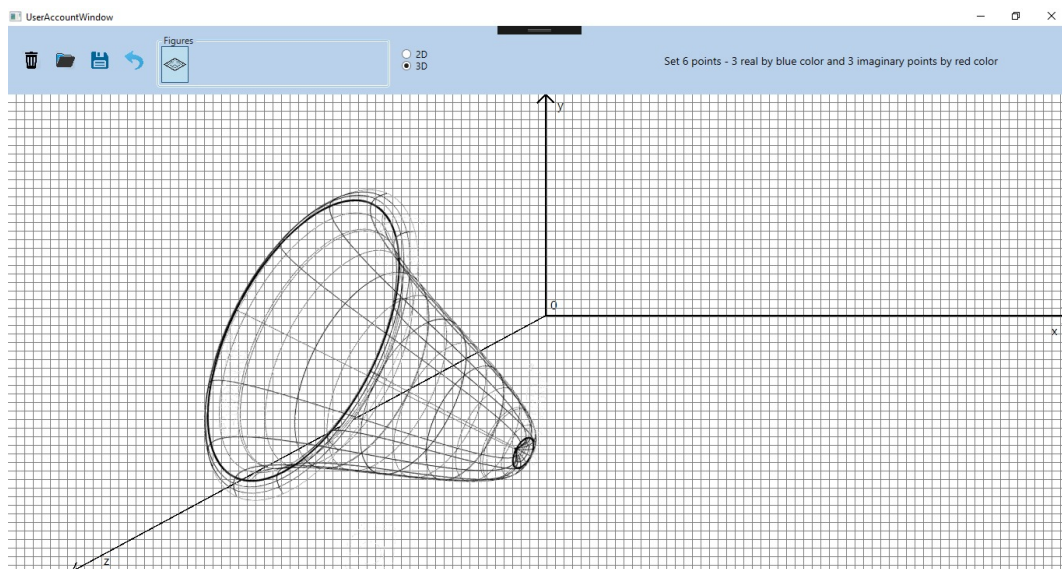


Рисунок 4.21 — Приклад виконання моделювання складної ізотропної поверхні у вигляді дзвоника

Програмний додаток включає в себе функціонал для зберігання історії побудови фігур та можливість відмінити попередні дії користувача, що проявляє гнучкість та адаптованість системи для зручного конструювання фігур різної складності.

Різниця користування системою зареєстрованими користувачами полягає у наданні додаткового функціоналу (рисунок 4.22), у вигляді можливості друку історії моделювання за допомогою кнопки “Відправити на друк” (рисунок 4.23), експортувати історію моделювання у картинку з форматом “.png” (рисунок 4.24) та, звідси, збереження історії моделювання у БД для конкретного облікового запису користувача.

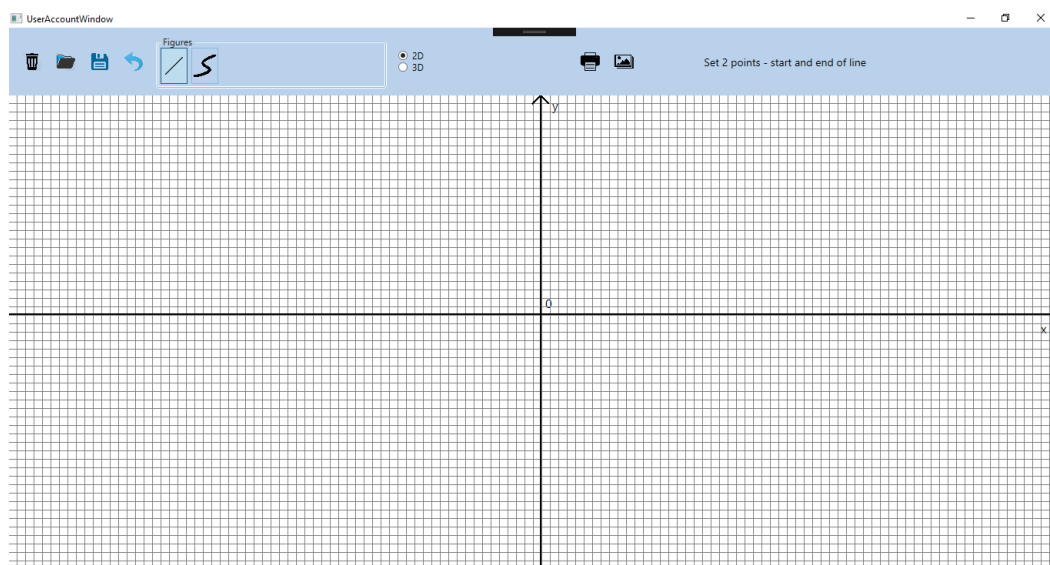


Рисунок 4.22 — Головне вікно системи для зареєстрованого користувача



Рисунок 4.23 — Кнопка для друку історії моделювання користувачем



Рисунок 4.24 — Кнопка для збереження історії моделювання користувачем у картинку з форматом “.png”

Функціонал для створення облікового запису користувача у системі було реалізовано з наміром подальшого втілення можливості введення ліценційних підписок на продукт, що планується реалізувати у другій ітерації розробки стартап-проекту.

### 4.3 Висновки до розділу 4

Детально описано інструкцію використання програмного забезпечення користувачем, в тому числі пояснено кожну функціональну одиницю графічного інтерфейсу, а з-поміж того ще й надано основну інформацію щодо обробки певних запитів, як позитивних, так і негативних, після взаємодії з інтерфейсом.

Сформовано приклади використання програмного додатку та представлено на скріншотах.

Проаналізовано поведінку системи у конкретних випадках взаємодії з користувачем.

Отже, інтерфейс програмної системи є інтуїтивним у використанні. Програмний продукт включає роботу з лініями, плоскими ізотропними кривими Без’є третього порядку та складними ізотропними поверхнями.

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Програмний застосунок “Izoserfer”, який містить математичну модель для побудови плоских ізотропних кривих Без’є третього порядку, складні ізотропні поверхні, який відрізняється тим, що підтримує функціональну можливість побудови вихідної інформації на основі редагування вхідної інформації опосередковано використовуючи графічний інтерфейс для взаємодії користувача з програмним кодом.

### 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Проаналізуємо зміст ідеї, її можливі напрямки застосування, відмінність запропонованої ідеї від існуючих аналогів, а також основні переваги, які може отримати користувач системи [23]. Результати аналізу представлені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Удосконалення програмного забезпечення для моделювання складних ізотропних поверхонь	1. Навчальні заклади (студенти, викладачі)	Аналіз формування мінімальних поверхонь, дослідження природних явищ (мильна плівка).
	2. Архітектура	Застосування при формуванні зонтичних поверхонь.

Проблеми:

1. Необхідність поглиблення користувача до математичної складової і її програмної реалізації при геометричному моделюванні мінімальної поверхні.
2. Відсутність підтримки змін у динамічному режимі при редагуванні параметрів ізотропної поверхні.

3. Відсутність можливості використання графічного інтерфейсу для опосередкованої взаємодії між користувачем і програмним забезпеченням при моделюванні складних ізотропних поверхонь.

Відомі застосунки подібного призначення, які підтримують можливість побудови мінімальних поверхонь але без залучення графічного інтерфейсу для налаштування параметрів поверхні користувачем.

Оскільки націлено забезпечити можливість використання графічного інтерфейсу для опосередкованої взаємодії користувача з програмним кодом, що характеризує винахідницький рівень винаходу, то з застосуванням додатку збільшиться швидкість реалізації спроектованої користувачем геометричної моделі та, відповідно, зменшиться «порог входження» у геометричне моделювання мінімальних поверхонь.

Доцільно провести аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно з пропозиціями конкурентів. Результат аналізу у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Izoserfer	Auto-CAD	Maple	3Ds Max			
Економічні характеристики							
вартість обслуговування	Безкоштовно	\$185/місяць, \$1 470/рік, \$4 410/3 роки	\$1 560/рік	\$190/місяць, \$1 505/рік, \$2 859.5 (5% discount)/2 роки, \$4 063.5 (10% discount)/3 роки	-	-	Продукт є безкоштовним для використання

Таблиця 5.2 (продовження)

вартість експлуатації	Безкоштовно	входить у вартість обслуговування	входить у вартість обслуговування	1.входить у вартість обслуговування	-	вартість експлуатації така ж як у конкурентів	Продукт є безкоштовним для використання
вартість утилізації		безкоштовно	безкоштовно	1.безкоштовно	-	1.вартість утилізації така ж як у конкурентів	
вартість витратних матеріалів		входить у вартість обслуговування	входить у вартість обслуговування	входить у вартість обслуговування	-	2.вартість витратних матеріалів така ж як у конкурентів	
вартість ремонту		входить у вартість обслуговування	входить у вартість обслуговування	входить у вартість обслуговування	-	вартість ремонту така ж як у конкурентів	

Таблиця 5.2 (продовження)

вартість знижки	Без- коштов но	free trial for 30 days, можливі знижки до 20% від вар- тості за рік, без- коштовн а версія для сту- дентів.	free trial for 30 days, ліцензія для сту- дентів: для курсо- вих та особистих занять - \$124 (весь час навчання); + 2 книги ( Precalculus Study Guide, Calculus Study Guide ), 15% знижки - \$174.90; для курсових, осо- бистих досліджень та наукових до- сліджень - \$618.75 (весь час нав- чання); + книга (The Mathematics Survival Kit) 15% знижки - \$136; для курскових та осо- бистих занять - \$99 (1рік); + книга (The Advanced Engineering Mathematics with Maple), 15% знижки - \$238.85.	free trial for 30 days, мо- жливість продати безстрокову ліцензію і заощадити 20% на 1 рік або 25% на трирічну пі- дписку, без- коштовна версія для студентів	-	-	Про- дукт є без- коштов ним для ви- кори- стання
--------------------	----------------------	---	--	--	---	---	---



Таблиця 5.2 (продовження)

Призначення (технічні характеристики)							
ОС	1.Mi- crosoft Win- dows 10 (64-bit, 32-bit), 8.1(64- bit, 32- bit), 7(64-bit, 32-bit);	Mi- crosoft Win- dows 10 (64-bit only), 8.1 (32- bit & 64- bit), or 7 SP1 (32- bit & 64- bit)	Microsoft Windows 10 (64-bit, 32- bit), 8.1(64- bit, 32-bit), 7(64-bit, 32- bit), Windows Server 2016(64-bit), Windows Server 2012(64-bit), Linux (64- bit), ma- cOS(10.14, 10.13, 10.12, 10.11)	Microsoft Windows 7 (SP1), Win- dows 8.1, or Win- dows 10 (64-bit)	ПЗ орієно- ване лише на ОС Win- dows	-	-
Про- цесор	1.4 giga- hertz (GHz)	1.2.5 GHz (3+ GHz recomme nded);	1.4 GHz	2 GHz	-	-	ПЗ підтри- мує мож- ливість ви- кори- стання процесо- ром з відносно невисокою потуж- ністю

Таблиця 5.2 (продовження)

Пам'ять	4 GB	8 GB (16GB recommended)	4 GB	8 GB	-	Для нормального функціонування ПЗ необхідне технічне обладнання з пам'яттю як у більшості конкурентів	-
Дисковий простір	4 GB	6.0 GB	4 GB	4 GB	-	Для нормального функціонування ПЗ необхідне технічне обладнання з дисковим простором як у більшості конкурентів	-
Екран	1024 x 768	1920 x 1080 resolution with True Color	1024 x 768 resolution	1.1024 x 768 resolution Will run on hardware below the above-stated system requirements but performance may be limited.	-	Роздільна здатність екрану така ж як у більшості конкурентів	-

Таблиця 5.2 (продовження)

Над- ійні- сть	ПЗ є до- стат- ньо надій- ним для кори- сту- вання, оскіль- ки пе- редба- чає за- хист при- ват- них про- єктів від сто- рон- ніх кори- сту- вачів.	Найпопу- лярніше піратське ПЗ Autodesk, що отри- мується через тор- ренти або шляхом злому. Неле- гальне викори- стання ПЗ включає не- санкціоно- ване ска- чування, копіюван- ня та розповсю- дження програ- много за- безпе- чення.	Почина- ючи з версії Maple 6 відбулося значне функціо- нальне розши- рення і зміна про- грами: до- дані алго- ритми чи- сельних ро- зрахунків компанії NAG, електронні таблиці, кон- текстно за- лежні ко- манди, крім того відбулася істотна зміна мови	Основне но- вовведення стосується впрова- дження но- вого інстру- менту Mesh Inspector і оп- тимізації «глючності» і падінь mental ray при візуаліза- ції великих сцен. Інструмент Mesh Inspector, пе- ревіряє гео- метрію Editable Mesh і Editable Poly на поми- лки в каналах текстур (Texture Channels) і топології. Це дозволяє	-	ПЗ має незаплямо- вану репутацію серед майбутніх користу- вачів, велику увагу при розробці ПЗ по- кладено для забезпе- чення надійності від початку функціонування до- датку, а всі зусилля направлені на макси- мальне відлагод- ження всього функціоналу ПЗ.	-
----------------------	---	--	--	---	---	---	---

Таблиця 5.2 (продовження)

			<p>програмування, він став більш сучасним - об'єктно орієнтованим. Всі ці та безліч інших змін, на жаль, призвели також до збільшення помилок, що викликало нарікання користувачів. Саме тому розробники версії Maple 8 основну увагу приділили усунення помилок і підвищення надійності. Зусилля увінчалися успіхом. За наявними тестами і відгуками користувачів - Maple 8 найбільш надійна версія після Maple V 4.0.</p>	<p>зменшити число помилок, з якими може не впоратися 3ds Max.</p> <p>Тепер, якщо система візуалізації mental ray не здатна візуалізувати сцену і видає фатальну помилку, 3ds Max продовжить працювати і виконувати більшість функцій. Однак якщо вам необхідно виконати візуалізацію сцени засобами mental ray, 3ds Max необхідно буде перезапустити.</p>			
--	--	--	---	---	--	--	--

Таблиця 5.2 (продовження)

Портативність	Десктопне ПЗ	Наявні десктопна і web, mobile-версії ПЗ	Десктопне ПЗ	Наявні десктопна і web mobile-версії ПЗ	В рамках першого релізу розглядається розробка лише десктопної версії ПЗ	-	-
Дизайн	Планове статичне тестування інтерфейсу на предмет зручності використання.	Змінено дизайн значків для поліпшення їх візуального представлення при різних дозволах. Тепер можна спільно використовувати види креслень і отримувати	Змінено дизайн головної сторінки ПЗ для поліпшення зорового сприйняття користувачами (базується на відгуках реального використання додатку)	Впроваджено поліпшення базових компонентів інтерфейсу на фоні фідбеку користувачів відносно неінтуїтивності функціоналу, який реалізує даний інтерфейс	-	Є можливість дослідження виграних позицій дизайну конкурентів, незапланована	-

Таблиця 5.2 (продовження)

		зворотний зв'язок, зберігаючи контроль над файлами DWG. Стало набагато простіше порівняти два креслення завдяки новій функції порівняння файлів DWG. Відкриття та збереження креслень в облікового запису AutoCAD в інтернеті і на мобільних пристроях є прекрасним способом мати доступ до даних поза робочого кабінету					репутація майбутнього ПЗ, планове тестування зручності використання інтерфейсу ПЗ потенційними користувачами (статичне тестування)
--	--	--	--	--	--	--	--

В результаті дослідження сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту було проаналізовано техніко-економічні характеристики існуючих на ринку

конкурентів, що, у свою чергу, надає можливість спрогнозувати частку майбутніх потенційних користувачів. А, враховуючи, що основна мета майбутнього ПЗ – удосконалення вже існуючих систем з подібним функціоналом, маємо досить успішні наміри завоювати прихильність на вітчизняному ринку.

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Для проведення технічного аудиту ідеї проекту, потрібно провести аудит технології [23], за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту, визначити чи доступні ці технології, та чи потребують вони допрацювання. Результат представлений у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	2	3	4
Моделювання, модифікація складних ізотропних поверхонь.	Середовище розробки Visual Studio 2019	Наявні	Доступні для вільного користування
Створення графічного інтерфейсу програмного додатку.	Середовище розробки Visual Studio 2019		
Додавання ізотропних характеристик, моделювання мінімальної поверхні.	Середовище розробки Visual Studio 2019, бібліотека System.Numerics для роботи з комплексними числами;		
Збереження у БД.	Середовище розробки Visual Studio 2019, RemoteMySQL, PhpMyAdmin		

Таблиця 5.3 (продовження)

1	2	3	4
Механізм аутентифікації та авторизації користувача.	Середовище розробки Visual Studio 2019, метод хешування пароллю.	Наявні	Доступні для вільного користування

Обрані технології є доступними, не потребують допрацювань, а також безкоштовні та надають усі необхідні можливості для реалізації поставленої задачі.

### 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Ідентифікація ринкової спроможності, яку можна використати під час ринкового реалізування проекту, та ринкових ризиків, які можуть завадити впровадженню проекту, надає можливість розробити стратегію розвитку проекту, беручи до уваги стан ринкового середовища, потреби потенційних клієнтів та пропозиції проектів-конкурентів [23]. Проведемо аналіз попиту (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2
Кількість головних гравців, од	3 головних гравців
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	\$3,5 млрд
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Затвердження ліцензійних умов впровадження, створення маркетингової стратегії для проведення ефективної рекламної діяльності стосовно ПЗ



Таблиця 5.4 (продовження)

1	2
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	+75%

За початковим аналізом поточний ринок є достатньо привабливим для впровадження продукту. При проведенні збору статистичних даних, що свідчать про підвищення попиту на подібні розробки, через збільшення інтересу до комп'ютерної графіки як з боку технічних спеціалістів, так і з боку звичайних користувачів. Беручи до уваги значний попит у розробці програмних комплексів подібного призначення, для поліпшення процесів розробки програмних продуктів та скорочення роботи розробникам, існує необхідність у розробці визначеної автоматизованої системи. Відтепер обираються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	2	3	4
Моделювання мінімальних поверхонь	Архітектори	Архітектори: застосування при формуванні зонтичних поверхонь.	Можливість відтворення побудови ізотропної поверхні на основі різних входних параметрів; впевненість, що побудована поверхня є мінімальною.

Таблиця 5.5 (продовження)

1	2	3	4
Вивчення методів візуалізації у комп'ютерній графіці.	Навчальні заклади (викладачі, студенти)	Викладач: навчання студентів моделювати складні ізотропні поверхні на основі кривої Без'є третього порядку ітераційним підходом. Студент: вивчення, здобуття практичних навичок у моделювання ізотропних поверхонь.	Можливість моделювання ізотропних кривих Без'є 3го порядку, криволінійних контурів та складних ізотропних поверхонь (на основі комплексних чисел).

В результаті обрання потенційних груп клієнтів необхідно провести аналіз ринкового середовища: скласти таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Результати представлені у таблицях 5.6 та 5.7 відповідно.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	2	3
Потужна клієнтська база конкурентів	Конкуренти, які мають впевнений досвід продукта на ринку здобули сильну базу клієнтів-споживачів.	Розвиток вражаючої маркетингової кампанії, створення стратегії піар-менеджменту, закладання регламенту рекламної кампанії, акційних пропозицій.
Зміни тенденцій ринку	Поява більш досконалої програмної системи від конкурентів, які значно довше на ринку.	Практично неможлива ситуація (на найближчі декілька років). Можливе вирішення - розробка нових сучасних необхідних удосконалень, тобто додання або заміна старого функціоналу на можливості розрахунку нових параметрів

Таблиця 5.6 (продовження)

1	2	3
Економічний спад	Скорочення попиту на програмний продукт внаслідок зміни економічного становища.	Пониження вартості; внесення корективів щодо напрямків цільової аудиторії.
Зниження	Існує вірогідність для ситуації, коли конкуренти отримають більший попит	Організація рекламних кампаній та промоакцій для програмного продукту

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

Фактор	Зміст	Можлива реакція компанії
1	2	3
Аналіз досвіду конкурентів	Формування стратегії реалізації проекту без навчання на своїх помилках, а при навчанні на помилках конкурентів – невдалі рекламні, маркетингові ходи конкурентів.	Планування і реалізація проекту з максимальним виключенням ймовірності виникнення помилок вже досвідчених конкурентів на ринку споживачів.
Націлення продукту на основні функціональності, які відсутні у конкурентів	Реалізація нових можливостей для споживачів, впровадження покращень суміжного з конкурентами проекту функціональностями.	Чітке планування задач, розподілення задач між розробниками з залученням прорахованих ризиків, мотивація команди ідеєю кінцевого продукту.

Таблиця 5.7 (продовження)

1	2	3
Можливість побудови власної репутації	Новий “гравець” на ринку має всі можливості для побудови власної репутації з “чистого листа”.	Пошук замовників, можливих покупців створеного програмного продукту, розширення бази замовників. Зарекомендувати себе, як надійну компанію.

Надалі необхідно провести аналіз пропозиції – вигнати загальні риси конкуренції на ринку, а саме обрати тип імовірної майбутньої конкуренції та її інтенсивність, рівень конкурентоспроможності за рівнем конкурентної боротьби, видами товарів і галузевою ознакою (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	2	3
1. Олігополістична конкуренція	Галузь в основному є конкурентною, проте існує декілька явних лідерів	Можливе виникнення складнощів при спробі потрапити на міжнародний рівень
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Закордонні конкуренти	Розвиток на українській ІТ арені та вихід на ринок
3. Внутрішньогалузева конкуренція	В пропозиціях на покупку програмного забезпечення (вигідні пропозиції), якості функціональностей.	Розробка вузьконаправленого програмного забезпечення

Таблиця 5.8 (продовження)

1	2	3
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між програмними забезпеченнями одного виду	Випуск кращих і якісніших версій програмного забезпечення, взаємодія з пропозиціями і побажаннями споживача.
5. За характером конкурентних переваг – нецінова конкуренція	Функціональні можливості програмного забезпечення	Розширити функціональні можливості
6. За інтенсивністю – марочна конкуренція	Для споживачів має значення «бренд»	Створення добре відомої марки

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що не дивлячись конкуренцію лідерів, у запропонованого проекту є можливість розвитку на українській ІТ арені з виходом на ринок. Можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною, це створення добре відомої марки та розширення функціональних можливостей програмного забезпечення.

Після аналізу конкуренції визначається більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (таблиця 5.9) - за моделлю п'яти сил М. Портера.

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі (1)	Потенційні конкуренти (2)	Постачальники (3)	Клієнти (4)	Товари-Замінники (5)
Складові аналізу	1. AutoCAD 2. Maple 3. 3Ds Max	Наявність товарних знаків, доступ до ресурсів	Основним постачальником є інтернет-ресурси	Торгівельні знаки, система інформації	відсутні

Таблиця 5.9 (продовження)

	1	2	3	4	5
Висновки	Конку- рентна бо- ротьба неін- тенсивна так, як прямі кон- куренти більше спеціалізу- ються на ін- ших функціо- нальних можливо- стях	Є можли- вості входу на ринок за рахунок гнучкості цін; потен- ціальна конкурен- ція є серед існуючих компаній	Постачаль- ники не впливають на визна- чення умов співпраці	Умови клієнтів в залежності від ситуації постійно змінюються	-

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером показав, що можлива робота на арені ІТ України так, як конкурентна боротьба неінтенсивна і прямі конкуренти орієнтовані на спеціалізації інших функціональних можливостей, також проекту необхідно відповідати умовам споживачів, які не є сталими.

На основі аналізу конкуренції за М. Портером, проведеного у таблиці 5.9, а також із враховуючи характеристики ідеї проекту (таблиця 5.2), вимог споживачів до товару (таблиця 5.5) та факторів маркетингового середовища (таблиці 5.6 і 5.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	2

Таблиця 5.10 (продовження)

1	2
Потреби споживачів	Обумовлюють необхідність розробки проекту
Результативність	Постійно призводить до кінцевого результату
Маркетинговий потенціал	Використання не за призначенням
Ціна та собівартість продукції	Не завищена, конкурентна ціна
Технічне обслуговування	Випуск нових версій продукту

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту, проведений у таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін програмного забезпечення для моделювання ізотропних кривих

Фактор конкурентоспроможності	Бали	Рейтинг програм-конкурентів у порівнянні з програмним забезпеченням «Maple»						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Потреби споживачів	10				+			
Результативність	15					+		
Маркетинговий потенціал	12					+		
Ціна та собівартість продукції	8			+				
Технічне обслуговування	17						+	

Останнім етапом ринкового аналізу можливостей реалізації проекту є забезпечення SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі проаналізованих ринкових ризиків та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>Цілодобова технічна підтримка; справка-інструкція по експлуатації; якість продукту; продукт відповідає потребам споживачів; доступність.</p>	<p>Слабкі сторони:</p> <p>Низька репутація компанії на початку впровадження проекту в життя; присутність багів.</p>
<p>Можливості:</p> <p>Вихід на міжнародний ринок; результативність; розвиток нових функціональних можливостей.</p>	<p>Загрози:</p> <p>Зниження доходів потенційних клієнтів; блокування реклами на просторах інтернету, соціальних мереж; блокування інтернет-ресурсу програмного забезпечення.</p>

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (таблиця 5.13).

Таблиця 5.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Проведення конференції-демо для закордонних користувачів	50%	3-6 міс.

В результаті SWOT- аналізу проекту було започатковано суміжну поведінку стартап-проекту на ринку та імовірний оптимальний час її впровадження беручи до уваги можливі проекти конкурентів, що потенційно заплановано вивести на ринок. В якості суміжного варіанту було обрано проведення конференції-демо для закордонних користувачів.

Отже, в результаті аналізу вирішено, по-перше, вивести програмний додаток на основний ринок, а вже згодом розглядати необхідність можливості розширення програмного функціоналу для користувачів.



## 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії перш за все здійснює обрання стратегії охоплення ринку [23], включаючи опис цільових груп потенційних споживачів, які визначені у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту) за рік	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Навчальні заклади	Готові	5000	Велика конкуренція	Середня
Архітектура	Готові	4500		

Оскільки різниця між цільовими групами зовсім незначна, а також враховуючи той факт, що компанія має бажання почати продажі (а відповідно і отримання прибутку) як найшвидше, то доцільно враховувати обидві цільові групи, тобто використовувати масовий маркетинг, пропонуючи стандартизовану програму. Після аналізу потенційних сегментів споживачів необхідно обрати цільові групи, для яких вони пропонуватимуть свій продукт, та визначити стратегію становлення лідером на ринку. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувані базову стратегію розвитку, яка визначається у таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	2	3	4
Проведення конференції для закордонних користувачів	Ексклюзивний розподіл	Відповідна ціна, довіра до бренду.	Стратегія лідерства по витратах

Таблиця 5.15 (продовження)

1	2	3	4
Вихід на нові ринки	Стратегія диференціації	Надання програмному продукту відмінних якостей, які роблять систему особливою на фоні аналогічних розробок	Стратегія диференціації
Розширення виробничої лінії	Стратегія диференціації (допускається стратегія спеціалізації)	Надання товару кращих властивостей та розширення функціоналу	Стратегія диференціації (допускається стратегія спеціалізації)

Для обраної альтернативи розвитку проекту було обрано ексклюзивний розподіл, а стратегію лідерства по витратах, як базову. Тому що, така стратегія передбачає, що компанія за рахунок чинників може забезпечити більшу, ніж у конкурентів маржу між собівартістю продукту і середньоринковою ціною. Вибір стратегії конкурентної поведінки визначається у таблиці 5.16.

Таблиця 5.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або має намір орієнтуватися на існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія дублювати основні характеристики продукту конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Проект не є першопрохідцем	Компанія має намір орієнтуватися на існуючих споживачів у конкурентів і шукати нових	Основні характеристики товару будуть схожими (Роздільна здатність, спектральний канал)	Стратегія позиціонування

Грунтуючись на вимогах споживачів обраної групи до постачальника (стартап-компанії) та до програмного додатку і на обраній базовій стратегії становлення та стратегії конкурентної поведінки необхідно розробити стратегію позиціонування (таблиця 5.17), що базується на формуванні позиції на ринку, за якою споживачам необхідно визначити торгівельну марку або проект.

Таблиця 5.17 Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Основна стратегія розвитку	Ключові конкуренто-спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Ціна, якість	Знизити ціни на продукцію та створити якісний товар	Відповідна ціна, довіра до бренду	Комп'ютерне моделювання, надійність, якість

При визначенні стратегії позиціонування були обрані вимоги до товару цільової аудиторії такі, як ціна та якість. Обрано базову стратегію розвитку: знизити ціни на продукцію та створити якісний товар; асоціації було обрано на базі вимог цільової аудиторії, які формують комплексну позицію проекту, а саме комп'ютерне моделювання, надійність, якість.

## 5.5 Розроблення маркетингової компанії стартап-проекту

Початковим етапом під час розробки маркетингової програми стартап-проекту є визначення маркетингової концепції продукту [23]. У таблиці 5.18 підсумовані результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18 Визначення головних переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	2	3

Таблиця 5.18 (продовження)

1	2	3
Оцінка якості ПП	Оцінка за метриками. Удосконалення оцінки будь-якої з обраних характеристик.	Розрахункові показники, точність та достовірність яких можна оцінювати; самостійність програмної системи.

Надалі розроблена трирівнева маркетингова модель товару: уточнюються ідея продукту, його фізичні складові та особливості процесу його надання (таблиця 5.19).

Таблиця 5.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
1	2		
I. Товар за задумом	Забезпечити можливість геометричного моделювання ізотропних кривих, контуру, плоских сіток й ізометричних поверхонь на основі кривих Без'є третього порядку.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Моделювання ліній, плоских кривих Без'є третього порядку; 2. Моделювання складних криволінійних контурів; 3. Моделювання складних ізотропних поверхонь; 4. Можливість графічної взаємодії з побудованою фігурою; 5. Можливість модифікувати обрану вже змодельовану раніше фігуру; 6. Можливість збереження у файл історії моделювання фігур.	-	-

Таблиця 5.19 (продовження)

1	2
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування
	Пакування – коробка з диском
	Марка: «DSoft» + «Izosorfer»
III. Товар із підкріпленням	До продажу: стандартна розроблена система Після продажу: додані додаткові можливості
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенту та комерційної таємниці	

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (таблиця 5.20): чи потрібно проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників, вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту, вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.20 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Бажання отримати більше за менші гроші	Пошук клієнтської бази та продаж	Нульовий рівень: тільки виробник	Вертикальна маркетингова система

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.21).

Таблиця 5.21 Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнти дізнаються про нові продукти з реклами в інтернеті, соціальних мереж, по рекомендаціям інших людей	Інтернет, соціальні мережі	Ціна, довіра до бренду.	- Розповсюдження інформації про продукт  - Інформація про випробування товару	- Перелік основних правдивих даних про продукт  - Науково-професійний стиль

Проналізувавши специфіку поведінки цільових клієнтів, було обрано концепцію рекламного звернення: 1.перелік головних реальних даних про продукт, 2. науково-професійний стиль. Реклама буде поширюватись через інтернет та соціальні мережі. Метою рекламного повідомлення є зацікавлення та поширення знань про продукт новим клієнтам, та поширення інформації про випробування товару.

## 5.6 Висновки до розділу 5

Отже, маркетингова програма орієнтовано має бути побудована таким чином:

- створення програмного продукту;
- пошук потенційних клієнтів (користувачі, компанії);

— базова стратегія розвитку – стратегія диференціації, тобто конкурентоспроможність формується шляхом надання споживачеві бажаного товару. На основі ретельного вивчення споживчого середовища розробляється одна або декілька відмітних характеристик власного товару;

— стратегія конкурентної поведінки – стратегія позиціонування, були обрані вимоги до товару цільової аудиторії такі, як ціна та якість. Обрано базову стратегію розвитку – знизити ціни на продукцію та створити якісний товар; асоціації було обрано на базі вимог цільової аудиторії, які формують комплексну позицію проекту-комп'ютерне моделювання, надійність, якість.

Конкурентні переваги створеного продукту очевидні, так як на вітчизняному ринку аналогів (а відповідно і конкурентів) не виявлено. У той час як попит на програмні системи подібного роду тільки набирає популярність, програмних систем, які створені для моделювання складних ізотропних поверхонь в Україні (цільовому ринку) немає. Схожих програмні розробки існують за кордоном, на інших мовах, проте існуючі аналоги призначені для зовсім інших потреб користувачів, а також є досить дорогими.

Перспективи впровадження з огляду на потенційні групи користувачів, стан конкуренції та конкурентоспроможності проекту – прямі, і тільки доводять можливість впровадження, та не марну розробку створеного програмного продукту.

## ВИСНОВКИ

Роботу присвячено актуальному напрямку геометричного моделювання кривих і поверхонь на основі комплексних чисел. При вирішенні поставлених задач були отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз існуючих на ринку систем моделювання AutoCAD, 3Ds Max та Maple. В ході аналізу було описано головні ідеї їх створення і впровадження, а також порівняно між собою у таблиці 1.1.

2. Встановлено, що на сьогоднішній день ринку не відомі програмні системи для моделювання складних ізотропних (на основі комплексних чисел) поверхонь шляхом визначення уявних і реальних параметрів при взаємодії з графічним полотном.

3. Розглянуто методи моделювання ізотропних кривих ліній і поверхонь у загальному вигляді, а також на конкретному прикладі кривих Без'є третього порядку, що дозволило визначити об'єкт дослідження.

4. Досліджено моделювання плоскої ізометричної сітки, що дозволило визначити спосіб формоутворення просторових кривих з подальшою можливістю відтворення даного моделювання на основі деформації плоскої кривої.

5. Обрано і проаналізовано засоби розробки програмної системи.

6. Спроектовано структурну модель (рисунок 3.2) і діаграму класів (рисунок 3.3) програмного додатку, а також діаграму послідовностей модулю аутентифікації користувача (рисунок 3.4).

7. Створено схему таблиць бази даних системи (рисунок 3.5).

8. Описано основні програмні модулі для моделювання, які були реалізовані у графічному редакторі.

9. Описано інструкцію використання програмного забезпечення користувачем:

1.1 Пояснено кожну функціональну одиницю графічного інтерфейсу, а зпоміж того ще й надано основну інформацію щодо обробки певних запитів, як



позитивних, так і негативних, після взаємодії з інтерфейсом.

2.1 Сформовано приклади використання програмного додатку та представлено на скріншотах.

3.1 Проаналізовано поведінку системи у конкретних випадках взаємодії з користувачем.

10. Розроблено маркетингову програму для стартап-проекту “Izoserfer”.

Створений програмний додаток виконує моделювання ліній, ізотропних кривих Без’є третього порядку та складних ізотропних поверхонь.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агальцев А.В. Моделирование минимальных поверхностей / А.В. Агальцев // Прикладная геометрия и инженерная графика. – К.: Будівельник, 1969. – Вып. 9. – С. 94 – 96.
2. Агальцев А.В. Некоторые графические способы построения поверхностей, близких к минимальным / А.В. Агальцев // Прикладная геом. и инженерная графика. – К.: Будівельник, 1969. – Вып. 8. – С. 66 – 71.
3. Аушева Н.М. Інтерактивне конструювання криволінійних обводів та гладких поверхонь / Н.М. Аушева, Р.Б. Берлінський // Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту. –К.: КДАВТ, 2001. – №2 – С.155–159.
4. Аушева Н.М. Моделювання мінімальних поверхонь Без`є / Н.М. Аушева // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. – Т.50, Вип.4. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – С.105–109.
5. Аушева Н.М. Розробка узагальненого підходу щодо формування кривих та поверхонь дійсного простору на основі ізотропних характеристик / Н.М. Аушева - Редакція Східно-Європейського журналу передових технологій, 2014. - С.17 – 20
6. Бляшке В. Дифференциальная геометрия и геометрические основы теории относительности Эйнштейна / В. Бляшке. - Главная редакция общетехнической литературы и номографии, 1935. - 330 с.
7. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник / И.А. Дружинский. - Л.: Машиностроение, 1985. - 263 с.
8. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики / Е.А. Никулин. - С.-Петербург: БХВ - Петербург, 2003. - 506 с.
9. Роджерс Д. Математические основы машинной графики [Текст]/ Д. Роджерс, Дж.Адамс - М.: Мир, 2001. - 604 с.

10. Якунин В.И. Инновационная стратегия комплексной информатизации геометрической и графической подготовки в высшем техническом профессиональном образовании на современном этапе. В. И. Якунин, Р. М. Сидорук, Л. И. Райкин, О. А. Соснина // Научно-методические проблемы графической подготовки в техническом вузе на современном этапе: материалы Междунар. науч.- метод. конф. Астрахань, 2010. - С. 228 – 235 .
11. Caron P. AG: A Set of Maple Packages for Symbolic Computing of Automata and Semigroups [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BFb0030652.pdf> .
12. Dowd M. The Art of Software Security Assessment: Identifying and Preventing Software Vulnerabilities / M. Dowd, J. McDonald, J. Schuh. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2006. – 1200 с.
13. Introduction. C# 6.0 draft specification. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/language-reference/language-specification/introduction>.
14. Research on AutoCAD secondary development and function expansion based on VBA technology [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/69/1/012107/pdf> .
15. Why use WPF? [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.codemag.com/Article/0911031/Why-Use-WPF>
16. Архитектура “клиент-сервер”. [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://www.mstu.edu.ru/study/materials/zelenkov/ch\\_7\\_1.html](http://www.mstu.edu.ru/study/materials/zelenkov/ch_7_1.html).
17. Векторна графіка. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/knit/auvp/2012/12-14/page14.html> .
18. Комп'ютерне геометричне моделювання у професійній проектно-конструкторській діяльності. [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://77.121.11.9/bitstream/PoltNTU/143/1/komp\\_geom\\_model.pdf](http://77.121.11.9/bitstream/PoltNTU/143/1/komp_geom_model.pdf) .
19. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного [Электронный ресурс] / М.А.Лаврентьев, Б.В.Шабат // 1973. — С. 682-727. — Режим доступа: [http://math.nw.ru/~pozharsky/3kypc/FilesAdd/Lavrentev\\_TFKP.pdf](http://math.nw.ru/~pozharsky/3kypc/FilesAdd/Lavrentev_TFKP.pdf) .

20. Моделювання складених кривих із застосуванням лінійних законів розподілу їх кривини [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://kt.chdu.edu.ua/article/view/65384/60635> .
21. Полиномы Берштейна и составные кривые Безье [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://dha.spb.ru/PDF/bernnsost.pdf> .
22. Програмне забезпечення [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5462335/>.
23. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
24. Розробка програмного забезпечення [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://softpro.ua/rozrobka-programnogo-zabezpechennja>.
25. Спосіб дискретного моделювання на основі суперпозицій точкових множин [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/2995/1/c\\_08.pdf](http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/2995/1/c_08.pdf)

Додаток 1

Моделювання складних ізотропних поверхонь

Апробації

УКР.НТУУ“КПІ”.ТР4275\_19М

Аркушів 8

2019





# ДИПЛОМ

**Нагороджується  
дипломом III-го ступеня  
ДОРОЩУК Дар'я Валеріївна,**

студентка 4-го курсу  
теплоенергетичного факультету  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
учасниця Всеукраїнського конкурсу студентських  
наукових робіт 2017/2018 навчального року  
зі спеціалізацій «Прикладна геометрія,  
інженерна графіка та технічна естетика»  
за роботу «Моделювання кривих і криволінійних  
обводів на основі ізотропних кривих Без'є»  
(науковий керівник – д.т.н., доцент АУШЕВА Н.М.)

Голова галузевої конкурсної комісії,  
проректор з наукової роботи  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»,  
д.т.н., професор



А. П. Марченко



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVI Міжнародної  
науково-практичної конференції  
аспірантів, магістрантів і студентів  
м. Київ, 24-27 квітня 2018 року,

ТОМ 2



Київ- 2018

Студент 4 курсу, гр. ТР-42 Дорошук Д.В.  
Проф., д.т.н. Аушева Н.М.

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КРИВИХ І ПЛОСКИХ СІТОК НА ОСНОВІ ІЗОТРОПНИХ ПАРАМЕТРІВ

Проектування споруд, мереж потребує створення сучасних методів моделювання кривих ліній, а це, у свою чергу, породжує нові методи формоутворення геометричних моделей сіток просторового покриття на стадії ескізного проектування. Одним із найпоширеніших методів задання кривої в комп'ютерній графіці є формування кривої Без'є, що базується на визначенні лише опорних вершин кривої, у зв'язку з чим відпадає необхідність запам'ятовувати кожен її точку, що моделюється. Проте не менш цікавим є аналіз моделювання ізотропної кривої з нульовою довжиною, що не є точкою на площині.

Мета дослідження полягає в створенні алгоритмічної бази для плоских ізотропних кривих Без'є та ізометричних сіток.

Загальне рівняння кривої Без'є третього порядку має наступний вигляд:

$$r = r_0(1-u)^3 + 3r_1(1-u)^2u + 3r_2(1-u)u^2 + r_3u^3, u \in [0,1], \quad (1)$$

де  $r_0, r_1, r_2, r_3$  — координати опорних вершин.

Будемо розглядати точки кривої Без'є у комплексному вигляді. Для визначення всіх координат ізотропної кривої Без'є необхідно визначити уявні частини вектора  $r_0$  [1]. В результаті одержимо:

$$r_{j+1} = [\operatorname{Re}(x_{j+1}) \pm \operatorname{Im}(x_{j+1}), \operatorname{Re}(y_{j+1}) \pm \operatorname{Im}(y_{j+1})], \quad (2)$$

$$\operatorname{Im}(x_{j+1}) = -\operatorname{Re}(y_{j+1}) + \operatorname{Im}(x_j) + \operatorname{Re}(y_j)$$

$$\operatorname{Im}(y_{j+1}) = \operatorname{Re}(x_{j+1}) - \operatorname{Re}(x_j) + \operatorname{Re}(y_j), j = 0 \dots (n-1).$$

Для побудови плоскої сітки на основі ізотропної кривої Без'є третього порядку було введено конформну заміну параметра  $t = u + iv$  в (1) [1].

Програмна система розроблена мовою програмування Java в середовищі IntelliJ IDEA з використанням зовнішньої бібліотеки комплексних чисел "org.apache.commons.math3.complex" та спеціального інструментарію Swing для створення графічного інтерфейсу користувача (GUI) у діалоговому режимі.

Результати виконання програмної системи наведені нижче:

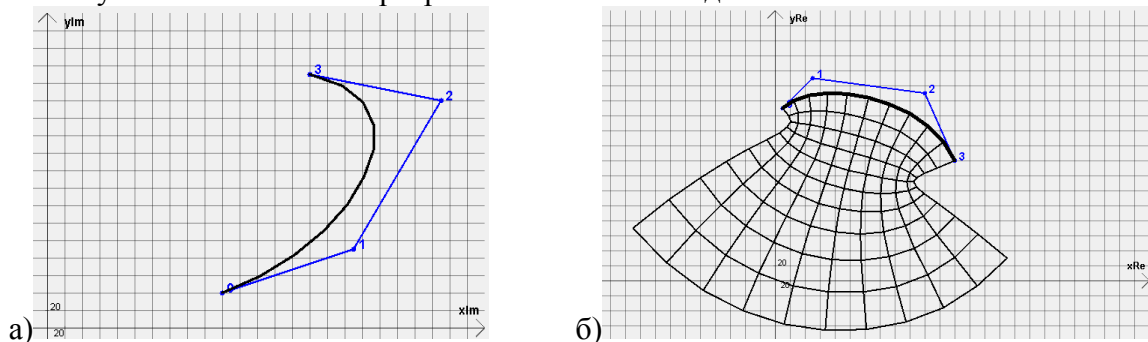


Рисунок 1 — а) побудова кривої Без'є третього порядку по уявним координатам опорних точок; б) моделювання ізометричної сітки

Перспективи подальших досліджень пов'язані з моделюванням ізометричних поверхонь.

Перелік посилань:

1. Аушева Н. М. Розробка узагальненого підходу щодо формування кривих та поверхонь дійсного простору на основі ізотропних характеристик [Текст] / Н.М. Аушева - Редакція Східно-Європейського журналу передових технологій, 2014. - С.17 - 20.



## Показчик авторів докладів

- Адасовський Б.І., 84, 100, 107  
Адах В.Г., 20  
Амброс С.М., 150  
Андрощук С.А., 96  
Антонюк К.В., 68, 69  
Астахов А.Г., 118  
Атаман Ю.С., 151  
Аушева Н.М., 70, 75, 88, 101, 102  
Баган Т.Г., 7, 8, 14, 16, 22, 27, 35, 51, 58, 59, 61, 62, 65  
Бадаєв Ю.І., 72  
Байда Д.В., 80  
Бандурка О.І., 249, 250, 251, 258, 261, 266, 267, 268, 270, 272  
Бараніченко О.М., 186  
Батін О.О., 218  
Батюк С.Г., 28  
Березанський Є.А., 43  
Березюк В.Д., 152  
Битик М.О., 267  
Бичков І.О., 153  
Білецький А.С., 203  
Білоус А.О., 119  
Бобков В.Б., 52, 64  
Бондарева В.А., 18  
Бондаренко А.В., 268, 269  
Борзяк М.А., 120  
Бочок В.О., 114  
Бугайов С.В., 227  
Будник К.І., 154  
Бунке О.С., 37, 43, 44, 45  
Бунь В.П., 19, 50, 55  
Бурлака А.Ю., 9  
Варава І.А., 228, 242, 247, 254, 257, 259, 260  
Василів М.М., 12, 14  
Васильєва О.Б., 203, 209, 210, 211, 212, 215, 217  
Василенко О.М., 204  
Васильченко Є.В., 18  
Верзун Є.С., 205  
Верлань А.А., 126  
Вертегел І.І., 121  
Вигівський С.А., 122  
Витвицький Д.А., 206  
Вільда Д.О., 81  
Віннічук М.В., 250, 251  
Власенко Н.А., 249  
Власюк Б.С., 115  
Власюк О.І., 16, 51  
Войташ В.В., 134  
Войтович С.В., 97  
Войтюк М.М., 62  
Врадій Д.В., 98  
Втерковська В.О., 228  
Гавриленко Д.Є., 237  
Гагарін О.О., 123, 133, 135, 140, 147, 157, 162  
Гайдаржи В.І., 120, 132, 145, 153  
Галушко А.В., 99  
Гвозденко О.В., 238  
Герасименко Л.О., 50  
Герасимюк С.М., 169  
Герик Б.В., 52  
Гетьманець О.І., 123  
Голінко І.М., 15, 20, 40, 66  
Голубенко О.О., 225  
Гольдич Я.Є., 252  
Гомов В.В., 70  
Горб І.Ю., 187  
Горб П.Ю., 223  
Горбенко О.Ю., 188  
Городецький М.В., 219  
Грикун П.І., 100  
Гритчук Д.Т., 53  
Грудзинський Ю.Є., 4, 5, 6  
Губеня А.В., 155  
Гуменний А.А., 189  
Гуменюк Л.М., 82  
Гургурова І.Л., 229  
Гурєєв М.В., 253  
Гуржій О.А., 125, 129, 131, 137  
Гурін А.Л., 97, 98, 111  
Гуровський В.Л., 230  
Гусєва І.І., 199, 201  
Дацюк О.А., 150, 151, 152, 167, 169, 170  
Дешко В.І., 225  
Дишлюк В.М., 32  
Дишлюк Р.М., 33  
Дідух М.О., 66  
Длугоборський В.В., 135  
Дорощук Д.В., 101  
Дровозюк В.О., 71  
Дрозд Д.С., 231

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVII Міжнародної  
науково-практичної конференції  
молодих вчених та студентів  
м. Київ, 23-26 квітня 2019 року,

ТОМ 2



Київ- 2019

Магістрант 5 курсу, гр. ТР-81мп Дорошук Д.В.  
Проф., д.т.н. Аушева Н.М.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОРЦІЇ НА ОСНОВІ ІЗОТРОПНИХ КРИВИХ БЕЗ'Є

Проектування споруд, мереж потребує створення сучасних методів моделювання кривих ліній, а це, у свою чергу, породжує нові методи формоутворення геометричних моделей сіток просторового покриття на стадії ескізного проектування. Одним із найпоширеніших методів задання кривої в комп'ютерній графіці є формування кривої Без'є, що базується на визначенні лише опорних вершин кривої, у зв'язку з чим відпадає необхідність запам'ятовувати кожен її точку, що моделюється. Це стосується і просторових поверхонь, для яких використовуються порції Без'є. Цікавим розширенням можливостей є застосування ізотропних просторових кривих [1].

Мета дослідження полягає в удосконаленні методів моделювання порції на основі ізотропних кривих Без'є.

Розглянемо моделювання ізотропної кривої Без'є на основі кубічної аналітичної функції  $f(t)$ :

$$f(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \quad (1)$$

Рівняння координат ізотропної кривої [1] матимуть вигляд:

$$x = i \cdot (a_0 - a_2) - 3a_3t + a_3t^3, \quad y = (a_0 + a_2) + 3a_3t + a_3t^3, \quad z = i \cdot (a_1) + 3a_3t^2. \quad (2)$$

Скористаємось умовою (2) та запишемо рівняння просторової ізотропної кривої Без'є:

$$r(t) = r_0(1-t)^3 + 3r_1(1-t)^2t + 3r_2(1-t)t^2 + r_3t^3, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{де } r_0 &= (a_0 - a_2) \cdot i, \quad a_0 + a_2 - a_1i, \\ r_1 &= (a_0 - a_2 - a_3) \cdot i, \quad a_0 + a_2 + a_3 - a_1i, \\ r_2 &= (a_0 - a_2 - 2a_3) \cdot i, \quad a_0 + a_2 + 2a_3 - a_1i, \\ r_3 &= (a_0 - a_2 - 2a_3) \cdot i, \quad a_0 + a_2 + 4a_3 - a_1i. \end{aligned}$$

Загальне рівняння для моделювання порції на основі кривої Без'є має вигляд:

$$r(u, v) = r_0(v)(1-u)^3 + 3r_1(v)(1-u)^2u + 3r_2(v)(1-u)u^2 + r_3(v)u^3, \quad (4)$$

$$r_i(v) = r_{i0}(1-v)^3 + 3r_{i1}(1-v)^2v + 3r_{i2}(1-v)v^2 + r_{i3}v^3,$$

де криві  $r_i(v)$  розраховуються на основі рівняння ізотропної кривої Без'є (3).

В ході проведення досліджень побудови порції на основі ізотропної кривої Без'є було розроблено програмне забезпечення мовою програмування Java в середовищі IntelliJ IDEA з використанням зовнішньої бібліотеки комплексних чисел — [org.apache.commons.math3.complex](http://org.apache.commons.math3.complex) та спеціального інструментарію Swing, яке дозволяє керувати побудовою, деформувати та дослідити порцію.

Перелік посилань:

1. Дорошук Д.В. Геометричне моделювання кривих і плоских сіток на основі ізотропних параметрів / Д.В. Дорошук, Н.М. Аушева // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м.Київ, 24-27 квітня 2018р. у 2т. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 – Том 2. – С.101
2. Аушева Н. М. Розробка узагальненого підходу щодо формування кривих та поверхонь дійсного простору на основі ізотропних характеристик [Текст] / Н.М. Аушева – Редакція "Східно-Європейського журналу передових технологій", 2014. – С.17 – 20.

## Показчик авторів докладів

- Bespala O.M., 152  
Slipchenko V.G., 152  
Адах В.Г., 14  
Амброс С.М., 134  
Анісіфоров Д.О., 35  
Антонюк К.В., 63  
Аушева Н.М., 65, 71, 80, 81, 82  
Баб'як В.В., 179  
Баган Т.Г., 24  
Багінський В.О., 36, 37  
Бадаєв Ю.І., 77  
Балицька Т.О., 38  
Бандурка О.І., 165, 168, 171, 173, 174, 178, 179  
Бараніченко О.М., 93  
Басалик Г.А., 174  
Басалик Д.А., 173  
Батюк С.Г., 13  
Безверщенко П.Р., 39  
Березанський Є.А., 15  
Бетін В.С., 135  
Битик М.О., 172  
Бобков В.Б., 33  
Богач А.Г., 178  
Богза М.С., 40, 41  
Бойко І.В., 86  
Бондаренко А.В., 171  
Борозенець М.Р., 85  
Брунько П.В., 105  
Будько Д.І., 160  
Бунке О.С., 15, 22  
Бунь В.П., 16, 29, 30, 39, 54, 56  
Вайц Д.В., 8  
Варава І.А., 130, 136, 142  
Верлань А.А., 153, 158  
Витвицький Д.А., 104  
Вишняк О.М., 84  
Вільда Д.О., 67  
Возний М.П., 42, 43  
Волков О.В., 148  
Волощук В.А., 4, 7, 31  
Гагарін О.О., 95, 96, 98, 103  
Гайдаржи В.І., 107, 108, 112, 115, 132  
Гарбовський М.В., 159  
Гаркуша О.В., 170  
Герасименко Л.О., 16  
Гікало П.В., 10, 25  
Голінко І.М., 14  
Головачук С.В., 147  
Гольдич Я.Є., 72  
Гончар О.В., 169  
Горбатюк О.І., 168  
Городецький М.В., 87  
Гритчук Д.Т., 17  
Грудзинський Ю.Є., 34, 49  
Гуменюк Л.М., 66  
Гуржій О.А., 139  
Гурін А.Л., 79, 83  
Давидчук О.С., 167  
Дацюк О.А., 109  
Демчишин А.А., 76, 86  
Демчук Д.В., 83  
Дишлюк В.М., 18  
Дишлюк Р.М., 19  
Дормідонтов В.С., 117  
Дорощук Д.В., 71  
Дудко А.В., 142  
Дудник В.Ю., 64  
Дудник С.О., 20, 21  
Єлманов Б.О., 119  
Єфремов О.Ю., 44  
Жирнов А.Ю., 166  
Жиров М.І., 165  
Жорновий Е.Г., 133  
Журавльов Р.В., 146  
Завістовська А.І., 70  
Загребельний Є.О., 82  
Задачин Г.С., 141  
Задачин С.С., 140  
Заковоротний О.І., 81  
Зарицький В.П., 103  
Захарченко А.С., 12  
Здор К.А., 116  
Іваниця Є.І., 118  
Іванів А.П., 115  
Іванов Б.Ю., 45  
Іщенко П.О., 158  
Каліка І.М., 80  
Караєва Н.В., 157  
Карпенко Є.Ю., 113  
Карпенко С.Г., 89, 90, 91, 118, 119, 120  
Киба І.А., 145  
Коваль Д.О., 13  
Коваль О.В., 122, 169  
Ковальчук А.М., 124, 125, 126, 133, 134, 138, 140, 141  
Ковальчук Г.О., 23  
Ковальчук Д.О., 22